PENDELRAHMEN ZUR PRÜFUNG VON FLUGMOTOREN

VON DER

KÖNIGL. TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU

ZUR

ERLANGUNG DER WÜRDE EINES DOKTOR-INGENIEURS

GENEHMIGTE

DISSERTATION

VORGELEGT VON

DIPL.-ING. OTTO THEODOR STEINITZ
AUS BEUTHEN, OBERSCHL.

REFERENT: PROFESSOR DR.-ING. BAER
KORREFERENT: PROFESSOR DR.-ING. MANN

TAG DER MÜNDLICHEN PRÜFUNG: 4. DEZEMBER 1915

DRUCK VON R. OLDENBOURG IN MÜNCHEN
1916

PENDELRAHMEN ZUR PRÜFUNG VON FLUGMOTOREN

64077

VON DER

KÖNIGL. TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZU BRESLAU

ZUR

ERLANGUNG DER WÜRDE EINES DOKTOR-INGENIEURS

GENEHMIGTE

DISSERTATION

VORGELEGT VON

DIPL.-ING. OTTO THEODOR STEINITZ
AUS BEUTHEN, OBERSCHL.

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

REFERENT: PROFESSOR DR.-ING. BAER
KORREFERENT: PROFESSOR DR.-ING. MANN

TAG DER MÜNDLICHEN PRÜFUNG: 4. DEZEMBER 1915

DRUCK VON R. OLDENBOURG IN MÜNCHEN
1916

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung.

a) Methoden der Leistungsbestimmung an Motoren . . . 5
b) Grundprinzip und Definition der Pendelrahmen . . . 5
c) Vorbemerkungen über die Bearbeitung des Themas . . 5

I. Konstruktionsbedingungen.

A. Nachahmung des praktischen Betriebszustandes . 7

1. Der ortsfeste Stand 7
2. Die Festigkeit der Aufstellung des Motors 7
   a) Der frei schwebende Motor 7
   b) Der starr gelagerte Motor 8
   c) Der elastisch gelagerte Motor 9
3. Luftströmung und Belastungsweise 11
4. Schräglagen 11
5. Änderung des Luftzustandes 12

B. Messungen 13

a) Das Drehmoment 13

1. Lage der Drehachse 13
2. Fehlerquellen des Motors 13
   a) Rückdruck des Auspuffs 14
   b) Seitendruck des Schraubenstrahls 17
   c) Kräfte aus dem Bedienungsgestänge 19
   d) Kräfte aus den Betriebsstoffleitungen 19
3. Fehlerquellen des Pendelrahmens 19
   a) Festigkeitseigenschaften 19
   b) Tarierung und Unempfindlichkeit 20
   c) Dämpfung 21
   d) Eichung 21

Seite

β) Die Nebenmessungen 21
   a) Drehzahl 21
   b) Axialschub 22
   c) Gewicht 22
   d) Weitere Größen 22

C. Allgemeine Gesichtspunkte 22

1. Betriebssicherheit 22
2. Wirtschaftlichkeit 23

II. Bauarten.

A. Pendelrahmen mit axialer Lagerung 24

1. Lager vor und hinter dem Motor. Bauarten Luftschiffbau Zeppelin, Benz, N.A.G., Scheit 25
2. Lager hinter dem Motor 25
   a) Bauart Riedler 26
   b) Neue Bauart der Deutschen Versuchsanstalt . . 27
3. Pendelung um ideelle Achse 27
   a) Bauart der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt 27
   b) Vorschlag Madelung 30
   c) Bauart Baer 30

B. Pendelrahmen mit desaxialer Lagerung 30

1. Pendelung um feste Lager 30
   a) Bauart des Automobile Club de France 30
   b) Bauart Gnôme 31
   c) Bauart Daimler 31
2. Pendelung um Metazentrum 31
3. Pendelung um bewegliche Lager. Bauart Steinitz . 31

Schluſs.

Quellenangabe 33

Einleitung.

Zur Prüfung der Leistung von Kraftmaschinen mißt man in der Regel die Tourenzahl und das erzeugte Drehmoment und berechnet den Effekt in PS nach der Formel $N = \frac{M_d \cdot n}{716{,}2}$. Bei elektrischer Bremsung oder Verwendung summierender Dynamometer kann man allerdings sofort die Leistung ablesen, doch liegt auch bei den letzteren der Anzeige meist die getrennte Messung von Tourenzahl und Drehmoment zugrunde. Man wird auch gewöhnlich ein Interesse daran haben, diese beiden Faktoren des Effekts getrennt zu erhalten, da man so einen tieferen Einblick in die Entstehung der Arbeit erhält.

Wenn das die Belastung bildende Drehmoment eine bestimmte Funktion der Tourenzahl ist, wie dies bei der Belastung durch Windflügel oder Luftschrauben der Fall, so kann die Leistung auch durch Messung der Tourenzahl allein bestimmt werden. Das zu jeder Tourenzahl gehörende Drehmoment ist dann durch einen besonderen Eichversuch zu ermitteln, bei welchem der Belastungswiderstand von einem Motor, dessen Leistung bekannt oder einfach zu bestimmen ist, also in der Regel durch einen Elektromotor, angetrieben wird. Bei dem ersten Wettbewerb um den Kaiserpreis für den besten deutschen Flugzeugmotor ist die Bestimmung der Leistung auf diesem Wege der Preisverteilung zugrunde gelegt worden.

Gegen dieses Verfahren bestehen jedoch schwerwiegende Bedenken. Im allgemeinen wird der Belastungswiderstand sich beim Antrieb durch verschiedene Motoren nicht völlig gleich verhalten, und auch die Veränderung von Nebenumständen, wie Temperatur, Barometerstand od. dgl. machen die Übertragung der Eichresultate schwierig. Der sofortigen Messung des Drehmoments beim Hauptversuche ist daher unbedingt der Vorzug zu geben.

Zur Bestimmung von Drehmomenten dienen »Dynamometer« in verschiedenster Ausführung, und zwar pflegt man Bremsdynamometer und Transmissionsdynamometer zu unterscheiden. Der prinzipielle Unterschied beider Gattungen liegt in der Aufnahme der erzeugten Arbeit. Bei den Bremsdynamometern wird sie vernichtet, d. h. in Reibungs- oder elektrische Energie verwandelt, welche nun ihrerseits gemessen wird. Bei Transmissionsdynamometern wird sie unter Zwischenschaltung des Meßapparats fortgeleitet. Diese zweite Art ist gewiß oft vorteilhaft, weil sie gestattet, die Arbeit in der Weise zu verwenden, wie es dem praktischen Betriebe entspricht. Für Flugmotoren kommt sie jedoch kaum in Betracht, weil bei diesen die Arbeit unmittelbar von dem kurzen Endstumpf der Kurbelwelle an den Propeller übertragen wird, so daß die Zwischenschaltung eines Dynamometers nicht möglich erscheint. Daher prüfen auch die meisten Firmen ihre Flugmotoren mit Bremsdynamometern, und zwar sind sowohl Bremszäume als auch Wasser-, Luft- und elektrische Bremsen im Gebrauch.

Daneben tritt neuerdings eine dritte Art der Dynamometer auf, die in der zusammenstellenden Literatur mitunter noch nicht mit aufgezählt wird. Es sind dies die »Pendelrahmen«, die nach folgendem Prinzip arbeiten: Der Motor ruht nicht auf einem festen Fundament, sondern auf einem Rahmen, der unter dem Einfluß der Rückwirkung des vom Motor abgegebenen Drehmomentes um eine horizontale Achse schwingen kann. Die Drehkraft wird von einer geeigneten Kraftmeßvorrichtung aufgenommen. Ein solcher »Pendelrahmen« bildet eine Art Wage, welche aber nicht wie eine gewöhnliche Wage Kräfte, sondern Kräftepaare zu messen hat. Die Bezeichnung »Pendelwage«, die mitunter gebraucht wird, ist mißverständlich. Das kaiserl. Patentamt versteht z. B. unter »Pendelwagen« Gewichtswagen nach dem Prinzip der Briefwage. Auch der Name »Dynamometrische Wagen« ist schon vergeben, nämlich an die mit Zugmeßvorrichtung ausgestatteten Eisenbahnwagen. Daher erscheint die Einführung des Namens »Pendelrahmen« für diese Art von Drehmomentsmessern gerechtfertigt.

Ein Pendelrahmen ist also eine Vorrichtung zum Messen des Drehmomentes von Motoren, dadurch gekennzeichnet, daß der den Motor tragende Rahmen unter dem Einfluß des auf den Motor rückwirkenden Drehmomentes schwingen (»pendeln«) kann.

Als der Verfasser im Juli 1912 zur konstruktiven Ausbildung dieses Prinzips für die Zwecke des Wettbewerbes um den Kaiserpreis für den besten deutschen Flugzeugmotor herangezogen wurde, waren die dafür vorhandenen Unterlagen recht dürftig. Ausführungen, welche auch nur den bescheidensten Ansprüchen wissenschaftlicher Methoden genügen konnten, waren noch nicht veröffentlicht worden. Das wenige Material, das die in- und ausländische Literatur über den Gegenstand enthielt, konnte in der kurzen verfügbaren Zeit auch nicht aus allen Winkeln zusammengesucht werden. Galt es doch, die gesamte Prüfanlage bis Anfang Oktober nicht nur zu konstruieren, sondern auch auszuführen und betriebsfertig zu machen. Seitdem sind eine Reihe wertvoller Neuerungen von verschiedener Seite teils ausgeführt, teils angeregt worden. Auch sind praktische Erfahrungen gewonnen worden, die in Zukunft berücksichtigt werden müssen. Der Verfasser macht in der vorliegenden Arbeit den Versuch, das nunmehr vorhandene Material zusammenzufassen und die auftretenden Schwierigkeiten darzulegen, so daß für die künftige Entwicklung der Pendelrahmen eine Grundlage geschaffen wird, von der aus mit größerer Sicherheit konstruiert werden kann.

Der Stoff ist dabei in der Weise angeordnet, daß im ersten Teile die Konstruktionsbedingungen begründet werden. Bei dieser Gelegenheit gelangen vielfach Betriebsbedingungen zur Erörterung, die natürlich auf die Konstruktion von Einfluß sind. Es erübrigt sich demnach, dieselben in einem besonderen Abschnitte zu behandeln. Die bei der Pendelrahmenmessung gleichzeitig zu verwendenden Meßinstrumente wurden nicht mehr in die Untersuchung einbezogen, soweit sie keinen Einfluß auf den Bau des Rahmens haben. In der Beurteilung der einzelnen Punkte hat sich der Verfasser nicht nur von theoretischen Erwägungen, sondern größtenteils von den Erfahrungen leiten lassen, die ihm eine Anzahl Prüfstandsingenieure der führenden deutschen Flugmotorenfabriken mitteilten, und die er selbst gelegentlich des Wettbewerbes um den Kaiserpreis gemacht hat. Dieser letztere bildete demnach eine wesentliche Grundlage der Arbeit.

An der Hand der so gewonnenen Konstruktionsbedingungen werden im zweiten Teile die vorhandenen Ausführungsformen auf ihre Brauchbarkeit hin geprüft.

Schließlich werden einige Konstruktionsvorschläge gemacht, welche die noch verbleibenden Schwierigkeiten beheben sollen.

Bei der Drucklegung wurden inzwischen eingetretene Fortschritte, z. B. hinsichtlich der praktisch vorkommenden Motorgrößen durch kleine Textänderungen berücksichtigt.

I. Konstruktionsbedingungen.

A. Nachahmung des praktischen Betriebszustandes.

Eine Maschine, die ihre Arbeit unter so eigenartigen Betriebsverhältnissen verrichtet wie der Flugmotor, muß selbstverständlich so geprüft werden, daß alle diejenigen Umstände, welche einen Einfluß auf das Verhalten des Motors ausüben können, den Verhältnissen des praktischen Betriebes möglichst genau entsprechen. Andernfalls würde gegen die Prüfung mit Recht der Einwand erhoben werden, daß dieselbe keinen Aufschluß über die Fähigkeit des Motors, seine wahre Aufgabe zu erfüllen, gebe, also ihren Zweck verfehle.

Natürlich bezieht sich die Forderung auf diejenigen Umstände, welche einen wesentlichen Einfluß auf den Motor haben können. Bei dem Stadium, in welchem sich in der Gegenwart die Theorie der Flugtechnik noch befindet, ist es jedoch häufig nicht unbestritten, ob ein bestimmter Umstand einen wesentlichen Einfluß auf den Motor hat. In solchen Fällen wird man den Grundsatz festhalten müssen, daß auch diese Umstände möglichst nachzuahmen sind. Sollten freilich die sich hieraus ergebenden Bedingungen oder die weiter unten erörterten nicht alle gleichzeitig vollständig erfüllbar sein, wie man ohne weiteres erwarten muß, so wird man zu dem Kompromiß gedrängt, wenigstens eine möglichst große Anzahl der zu stellenden Anforderungen in möglichst vollkommener Weise zu erfüllen.

Eine ausführliche Zusammenstellung der eigentümlichen Betriebsumstände, welche ein Versuchsstand für Flugmotoren nachzuahmen hat, ist bisher von keiner Seite gegeben worden. Einige Andeutungen befinden sich in meinem kleinen Aufsatz »Die Prüfung der Flugmotoren«. Im folgenden sollen diese Bedingungen systematisch soweit erörtert werden, als sie die Konstruktion des Pendelrahmens beeinflussen.

1. Der ortsfeste Stand.

Von obigem Gesichtspunkte aus könnte man die radikale Forderung erheben, die Prüfung nur im Fluge vorzunehmen. Im Gegensatz zu den ortsfesten Maschinen ist es jedoch für Fahrzeugmotoren schwierig, die notwendigen Messungen während des ordnungsgemäßen Betriebszustandes, d. h. während der Fahrt, vorzunehmen, einerseits, weil das Fahrzeug nicht so leicht mit den erforderlichen Meßgeräten ausgestattet werden kann, anderseits weil während der Fahrt nicht alle zufälligen äußeren Einflüsse ausgeschaltet oder nach dem Wunsch des Experimentators abgeändert werden können. Immerhin erscheint diese Art der Prüfung für Automobil- und Bootsmotoren nicht ganz ausgeschlossen. Beim Flugmotor liegen jedoch die Verhältnisse bedeutend ungünstiger, so daß diejenigen, welche nur den Betrieb im wirklichen Fluge als zulässigen Prüfungsbetrieb anerkennen wollen, wenigstens mit den heute verfügbaren Mitteln auf eine recht rohe Empirie beschränkt bleiben. Aus den Erfahrungen des praktischen Fluges geht schließlich einwandfrei nur die gesamte Flugleistung hervor. Diese ist aber außer vom Motor noch von dem Propeller, dem Flugzeug mit seinen Trag- und Steuerflächen, den Zufälligkeiten der Witterung und den persönlichen Eigenschaften des Fliegers abhängig. Selbst die Tourenmessung, die allenfalls während des Fluges exakt vorgenommen werden könnte, gibt keinen sicheren Anhalt für die Beurteilung des Motors; denn abgesehen davon, daß die Instrumente, welche heute für Flugzeuge zur Verfügung stehen, noch viel zu wünschen übrig lassen, ist die Tourenzahl von einer Anzahl aerodynamischer Einflüsse abhängig, die unmöglich gleichzeitig genau beobachtet werden können. Man sieht also, daß aus den Leistungen der Flieger kein zuverlässiger Schluß auf die von ihnen benutzten Motoren gezogen werden kann. Es hat ja auch die Erfahrung gezeigt, daß von geschickten Piloten recht ansehnliche Leistungen mit schwachen oder unvollkommenen Motoren erzielt worden sind. Trotzdem hat man bis in die jüngste Zeit keinen anderen Maßstab für die Bewertung von Flugmotoren gekannt. Je mehr sich jedoch die Flugtechnik von der rohen Empirie zur exakten Wissenschaft entwickelt, um so weniger kann man mit dieser Art der Prüfung einverstanden sein. Vielmehr müssen die Motoren so untersucht werden, daß alle Nebeneinflüsse ausgeschaltet sind, oder nach Belieben variiert werden können.

Dieser Forderung kann natürlich nur ein fester Versuchsstand entsprechen. Freilich bringt ein solcher in der Form, wie man ihn zunächst aus der Automobilmotorentechnik übernommen hat, so tiefgreifende Betriebsveränderungen gegenüber dem Fluge mit sich, daß auch diese Art der Prüfung zunächst nur einen recht problematischen Wert hat. Will man die Prüfungseinrichtungen so ausbauen, daß sie tatsächlich ein brauchbares Urteil über die Güte des Motors in bezug auf seine eigentliche Bestimmung liefern, so muß man zunächst alle diejenigen Umstände, welche sein Verhalten beeinflussen, eingehend studieren; erst dann wird man in der Lage sein, eine Konstruktion für die Prüfung zu finden, welche der Bedingung genügt:

Der Prüfstand soll ortsfest sein und muß die Prüfung des Motors unter denselben Betriebsumständen gestatten, wie sie im freien Fluge herrschen.

2. Die Festigkeit der Aufstellung des Motors.

Der den Motor tragende Rahmen wird durch diejenigen Kräfte beansprucht, welche notwendig sind, um die Bewegungen zu verhindern, welche der Motor ausführen würde, wenn er frei im Raume schweben würde. Es sind daher zunächst die Bewegungen in diesem gedachten Zustande des freien Schwebens zu untersuchen. Diese lassen sich in zwei Gruppen zerlegen, erstens in solche, welche dauernd fortschreitende Veränderungen der Lage hervorrufen, zweitens in solche, welche spätestens nach zwei Umdrehungen der Kurbelwelle zur alten Lage zurückführen.

Zur ersten Gruppe gehört die Fallbewegung, die der Motor infolge seines Eigengewichtes einschlagen würde. Wir wollen annehmen, daß dieses Gewicht jedoch durch eine in jedem Augenblicke durch den Schwerpunkt gehende, vertikal nach oben gerichtete Gegenkraft aufgehoben sei. Ferner wird der Motor gemäß dem Gesetze der Gleichheit von Aktion und Reaktion eine Drehung entgegengesetzt der Drehung der Windflügel ausführen. Das Drehmoment, das ihn hierzu veranlassen will, ist gleich dem nutzbaren Drehmoment, welches auf die Windflügel wirkt, ev. vermehrt oder vermindert um die Stoßreaktion der Auspuffgase, je nach der Art der Anordnung der Auspufföffnungen. Diesem Drehmoment wirke ein anderes Drehmoment entgegen, das unveränderliche Größe, und zwar die Größe des Mittelwertes des wirklichen Drehmoments haben möge. Dann wird auch die rotierende Bewegung zu keiner fortschreitenden werden können.

Diese Kraft und dieses Kräftepaar bilden die hauptsächliche Beanspruchung des Rahmens. Durch ihre Anbringung wird der Motor für die Dauer in seiner Lage festgehalten. Dagegen beschreibt er noch, wie schon erwähnt, periodische Bewegungen, welche wegen ihrer schnellen Folge als Er-

schütterungen in Erscheinung treten. Die genaue Untersuchung dieser Bewegungen ist daher gleichbedeutend mit der Theorie der Erschütterungen eines Motors. Sie erklären sich aus folgenden Umständen:

1. Das Drehmoment schwankt um den vorhin erwähnten Mittelwert, und zwar infolge des mangelhaften Ausgleichs der Arbeitsdrücke, welcher aus dem Tangentialdruckdiagramm in der üblichen Weise festgestellt werden kann, aber außerdem auch noch infolge der Periodizität der Auspuffreaktion (vgl. S. 13 ff.). Dabei verteilen sich die Schwankungen des Drehmoments der Auspuffreaktion nicht zu gleicher Zeit gleichmäßig auf die vorderen und hinteren Zylinder, vielmehr befinden sich die einzelnen Zylinder in verschiedenen Phasen der Periode, woraus außer den Schwankungen um die Drehachse des Motors auch noch Schwankungen nach den beiden anderen Raumrichtungen resultieren.

2. Der Schwerpunkt des Motors bleibt in seiner relativen Lage zum Motorgehäuse während eines Umlaufes nicht erhalten, sondern beschreibt eine geschlossene Kurve. Unter genauer Kenntnis der Gewichte der einzelnen Triebwerks- und Steuerungsteile, welche sich gegeneinander verschieben, kann dieselbe im voraus berechnet werden. Die Kurve ist bei einem Mehrzylindermotor ziemlich kompliziert und liegt in einer Ebene, welche senkrecht auf der Drehachse des Motors steht. Bei einem einzylindrigen Motor ohne Massenausgleich würde die Bewegung des Schwerpunktes im wesentlichen aus einem Auf- und Absteigen, entsprechend der Bewegung der hin- und hergehenden Triebwerksteile, bestehen, und zwar wäre der Ausschlag gleich dem Kolbenhub vermindert im Verhältnis des Gewichts der hin- und hergehenden Massen zum Gewichte des gesamten Motors. Dieses Verhältnis zwischen Ausschlag und Kolbenhub sei als Erschütterungsquotient bezeichnet. Bei einem mehrzylindrigen Motor mit Ausgleich erster Ordnung der hin- und hergehenden Massen ist der Erschütterungsquotient nur ein Bruchteil des Verhältnisses zwischen den Gewichten des ganzen Motors und der hin- und hergehenden Massen. Bei der Berechnung können die Bewegungen der Steuerungsteile usw. gegenüber denen des Triebwerkes vernachlässigt werden. Die Periodenzahlen der Massenstöße eines in erster Ordnung ausgeglichenen 4-Zylindermotors ist gleich der doppelten Tourenzahl des Motors, wie sich aus der bekannten Formel für die Kolbenbeschleunigung

$$p = r\,\omega^2\,(\cos\alpha \pm \lambda \cos 2\alpha)$$

ergibt. Dabei folgen diese Schwingungen dem Sinusgesetz, können also ebenso betrachtet werden, wie die Schwingungen eines unausgeglichenen Einzylindermotors mit unendlich langer Schubstange und doppelter Tourenzahl, aber entsprechend kleinerer Kolbenmasse.

Der freischwebende Motor ist nun bestrebt, die Lage des Schwerpunktes beizubehalten, weshalb seine festen Teile die der Schwerpunktswanderung entgegengesetzte Bewegung ausführen. Diese Bewegung ist jedoch auch nicht immer eine reine Parallelverschiebung des Motors, sondern kann von einem Neigen begleitet sein, wenn die Massenverschiebungen nicht symmetrisch zur Mittelebene des Motors verlaufen, wie dies allerdings bei normaler Bauart der Fall ist.

Die periodischen Bewegungen infolge mangelhaften Massenausgleiches erstrecken sich also im allgemeinsten Falle auf Parallelverschiebungen vertikal und horizontal senkrecht zur Drehachse und auf drehende Schwankungen nach den beiden Richtungen durch die Drehachse. Bei Antrieb durch Luftschrauben tritt dazu infolge der Schwankungen der Zugkraft auch noch die Schwingungsmöglichkeit in der Richtung der Drehachse.

3. Infolge des gesamten Kräftespieles im Motor wechseln während der vier Arbeitstakte dauernd die Beanspruchungen der verschiedenen Teile der Maschine und infolgedessen auch die durch diese Beanspruchungen hervorgerufenen Formänderungen. Es findet gewissermaßen ein dauerndes Hin- und Herarbeiten des gesamten Motormaterials statt, das sich auch auf die Teile des Motors erstreckt, welche dazu bestimmt sind, mit dem Rahmen verbunden zu werden, nämlich das Gehäuse mit den Tragfüßen. Die Formänderungen infolge von Temperaturschwankungen wirken ähnlich. Nur ist bei ihnen nicht dieselbe vollkommene Periodizität vorhanden.

Ähnliche Verhältnisse finden sich allerdings bei jeder gesteuerten Maschine. Beim Flugmotor verdienen sie jedoch höhere Beachtung, weil wegen der außerordentlichen Sparsamkeit in der Verwendung des Baumaterials die Formänderungen verhältnismäßig große Beträge erreichen. Brüche des Gehäuses spielen ja auch unter den Betriebsunfällen dieser Motorenart eine erhebliche Rolle.

Die genaue Bestimmung dieser Bewegungen könnte durch Berechnung und durch experimentelle Beobachtung für eine bestimmte Motortype erfolgen. Die exakte Durchführung dieser Arbeit würde sowohl dem Motor- als auch dem Flugzeugkonstrukteur wichtige Fingerzeige liefern, aber freilich bei den heute vorhandenen Versuchseinrichtungen erhebliche Schwierigkeiten bieten, und es scheint daher richtiger, zunächst diese Prüfungseinrichtungen weiter zu vervollkommnen. Für diesen Zweck genügt es aber, die ungefähre Größenordnung der in Betracht kommenden Bewegungen und Kräfte abzuschätzen.

Bei der Beurteilung der Beträge, um die das Drehmoment um seinen Mittelwert schwankt, ist zu berücksichtigen, daß der Ungleichförmigkeitsgrad des Motors in ausgleichendem Sinne auf das Drehmoment wirkt, indem z. B. bei erhöhtem Drehmoment ein Teil der Kraft durch erhöhte Kolbenbeschleunigung absorbiert wird. Wie praktische Messungen zeigen, schwankt das Drehmoment von Flugmotoren nur um einen verhältnismäßig geringen Prozentsatz des mittleren Drehmoments. Es liefert daher keine Beanspruchung, welche die Beanspruchung durch das mittlere Drehmoment wesentlich verändert. Auch die durch die unter 3 aufgeführten Umstände hervorgerufenen Erschütterungen halten sich in verhältnismäßig engen Grenzen, so daß zu erwarten steht, daß die Erschütterungen durch die hin- und hergehenden Massen überwiegen. Dieses wird durch die Erfahrung am Prüfstande und im Flugzeuge bestätigt und geht überdies einwandfrei aus den sehr exakten Messungen des Advisory Committee for Aeronautics bei Gelegenheit des englischen Motorenwettbewerbes im Jahre 1911 hervor (vgl. Report on the tests of petrol motors usw.).

Es erscheint daher angebracht, für die angenäherte Berechnung der Erschütterungen zunächst nur mit denen der Klasse 2 zu rechnen und die anderen Umstände nur durch eine geeignete Variation des Erschütterungsquotienten q zu berücksichtigen. Dieser letztere gibt also das Verhältnis der größten Eigenbewegung des freischwebenden Motors zum Kolbenhub an, welches wegen der verschiedenen zusätzlichen Einflüsse nicht genau gleich dem auf die obenerwähnte Art berechneten Werte ist.

Sowohl die zitierten englischen Messungen als auch die Nachrechnung moderner deutscher Motorbauarten ergeben für q Werte in der Größenordnung 1 : 100. Dieser Wert soll den folgenden Überschlagsrechnungen zugrunde gelegt werden.

Gehen wir dazu über, das Verhalten des Motors zu betrachten, wenn derselbe in einem ortsfesten, vollkommen starren Rahmen eingebaut ist. Der Rahmen muß zunächst das Gewicht und das mittlere Drehmoment des Motors aufnehmen. Da das Drehmoment auf der einen Seite im entgegengesetzten, auf der anderen jedoch im gleichen Sinne wirkt wie das Gewicht, so sind die beiden Seiten des Rahmens wesentlich ungleich beansprucht. Dieser Umstand ist bei der Berechnung zu beachten, besonders wenn es sich nicht um einen vollkommen starren, sondern, wie bei den wirklichen Pendelrahmen, um einen elastischen Aufbau handelt.

Abgesehen von diesen Kräften, deren vollkommene Aufnahme durch den Rahmen unbedingt erforderlich ist, und auch den Verhältnissen des wirklichen Fluges entspricht, würde jedoch eine solche vollkommen starre Konstruktion auch alle bei dem freischwebenden Motor festgestellten Erschütterungskräfte auffangen. Diese Kräfte, welche bestrebt sind, periodische Bewegungen hervorzurufen, müßten also durch Gegenkräfte, die aus der Festigkeit des Rahmens resultieren, aufgehoben werden; der Rahmen seinerseits würde diese Kräfte an sein Fundament weiterleiten.

Die Größenordnung dieser Kräfte zeigt das folgende Rechnungsbeispiel, dessen Annahmen etwa einem 100 PS-Argus-, N.A.G.- oder Mercedesmotor entsprechen.

Ein Vierzylinder-Flugmotor vom Gewichte $Q = 200$ kg habe bezüglich der auf- und absteigenden Erschütterungen den Erschütterungsquotienten $q = 1 : 100$. Die seitlichen und drehenden Erschütterungen, welche erheblich kleiner sind, bleiben der Einfachheit halber unberücksichtigt. Ferner wurden bei dieser rohen Überschlagsrechnung die endliche Schubstangenlänge und die Desachsierung, die für jede Motorbauart eine andere ist, nicht berücksichtigt. Die nachfolgende Rechnung gilt also für den vollkommen starren Holm unter den genannten Vernachlässigungen. Es wird die größte Kolbenbeschleunigung $r\omega^2$. Während nun der Weg des Motors $q = {}^1/_{100}$ des Kolbenweges ausmacht, beträgt seine Beschleunigung wegen der doppelten Periodenzahl der Schwingungen $4q = {}^1/_{25}$ der Kolbenbeschleunigung, also maximal $b = 4qr\omega^2$. Die Kraft, die notwendig ist, um diese Beschleunigung zu erzwingen, ist

$$P_e = M \cdot 4qr\omega^2,$$

worin $M = \frac{Q}{g}$ die Masse des Motors bedeutet.

Es sei $n = 1400$, also $\omega = 146{,}5$

$$r = \frac{s}{2} = 75 \text{ mm},$$

dann wird $r\omega^2 = 1610$ m/sec^2 $= 165$ g und

$$P_e = \frac{200}{g} \cdot \frac{1}{25} \cdot 165 \text{ g} = 1320 \text{ kg}.$$

Das Drehmoment des Motors betrage 50 mkg, der Abstand der beiden Tragholme 500 mm. Dann drückt das Drehmoment auf den einen Holm mit $P_d = 100$ kg, während es den anderen mit der gleichen Kraft entlastet. Auf die beiden Holme wirken also ohne Berücksichtigung von P_e die ruhenden Kräfte

$$P_1 = \frac{Q}{2} + P_d = 200 \text{ kg}$$

und

$$P_2 = \frac{Q}{2} + P_d = \quad 0 \text{ kg}.$$

Infolge der Erschütterungen schwankt aber P_1 zwischen den Werten -460 und $+860$ kg und P_2 zwischen den Werten -660 und $+660$ kg, wenn die Holme vollkommen starr gelagert sind.

Diese Beanspruchung ist natürlich weitaus ungünstiger als diejenige, welche man erhalten würde, wenn die Erschütterungen nicht starr aufgenommen würden. Es ist nicht zum verwundern, wenn daher auf einem absolut starren Rahmen sonst gut brauchbare Motoren rasch zerstört wurden (vgl. S. 25). Merkwürdigerweise hat man mehrfach versucht, solche Übelstände durch Verstärkung der Rahmen statt durch deren Schwächung abzustellen.

Außer durch die völlige Verhinderung der Massenbewegung übt die starre Lagerung noch einen zweiten Einfluß auf die Beanspruchungen des Motors aus, und zwar deshalb, weil die Lagerung nicht nur an einem Punkte sondern an mehreren stattfindet. Die gegenseitige Lage dieser Befestigungsstellen ist dann durch den starren Rahmen absolut fixiert; das Motorgehäuse wird also von Kräften, welche eine Formänderung in dem Sinne bewirken würden, daß eine Lageänderung der Befestigungsstellen einträte, völlig entlastet. Anderseits können auch, z. B. infolge von Erwärmungen, Veränderungen der Lage erforderlich werden, und dann ruft die Starrheit des Rahmens wieder ungünstige Beanspruchungen hervor. Von vornherein ist daher nicht zu übersehen, ob die starre Verbindung einzelner Punkte des Motors durch den Rahmen für den Motor von Vorteil oder Nachteil ist. Jedenfalls bringt sie eine erhebliche Unklarheit in die Prüfung hinein.

Es ist ersichtlich, daß die wahren Verhältnisse des Flugmotorenbetriebes zwischen den beiden geschilderten Grenzzuständen der völlig freien Beweglichkeit und der völlig starren Rahmenlagerung liegen.

Die freie Beweglichkeit wäre nur vorhanden, wenn das mit dem Motor verbundene Flugzeug jede Bewegung des Motors sofort ausführen könnte. Das ist nicht der Fall, weil die Massen des Flugzeuges erst beschleunigt werden müssen und auch einen Widerstand in der Luft finden. Anderseits kann aber auch von einer starren Lagerung keineswegs die Rede sein, denn die eben genannten Widerstandskräfte treten erst dann auf, wenn schon eine gewisse Bewegung stattfindet. Auch finden schon beim Auftreten geringer Kräfte sofort größere elastische Durchbiegungen der Konstruktionsteile des Flugzeuges statt, welche dem Motor eine gewisse Bewegungsfreiheit geben. Es fragt sich also nur noch, welchem der beiden Grenzzustände sich der Flugbetrieb nähert oder wie weit er etwa von diesen abweicht.

Zur Beantwortung dieser Frage mögen hier die Gegenkräfte untersucht werden, die das Flugzeug den Erschütterungen des Motors entegenzustellen hat. Man ist zunächst versucht, anzunehmen, daß die großen Tragflächen durch die vorgelagerte Luft an der Bewegung verhindert werden und man hört oft von einer »elastischen Lagerung auf der Luft« reden. Wir wollen wieder ein überschlägiges Beispiel durchrechnen, um die Größenordnung dieses Einflusses festzustellen.

Das Flugzeug möge den oben als Beispiel angeführten Motor besitzen, mit dem Motor und Piloten $Q_f = 600$ kg wiegen und 30 qm Tragfläche haben. Dann würde das Flugzeug, wenn keinerlei Widerstand vorhanden wäre, eine hin- und hergehende Bewegung machen, deren Ausschläge ${}^1/_{300}$ derjenigen des hin- und hergehenden Kolbens wären, da für das ganze Flugzeug wegen der größeren Masse der Erschütterungsquotient $(200/600) \cdot q = 1 : 300$ ist. Die mittlere Kolbengeschwindigkeit ist bei unserem Beispiel $\frac{2 \cdot 0{,}15 \cdot 1400}{60}$ $= 7$ m/sec. Die mittlere Geschwindigkeit der Tragfläche wäre demnach mit Berücksichtigung der doppelten Schwingungszahl $2 \cdot \frac{7}{300} = 47$ mm/sec. (Die Komplikationen, die dadurch entstehen, daß außer der geradlinigen Bewegung auch Drehungen auftreten, mögen bei dieser überschlägigen Rechnung wieder unbeachtet bleiben.) Nach der für den vorliegenden Fall gut anwendbaren Formel von v. Lössel beträgt der Luftwiderstand einer ebenen, senkrecht gegen die Luft bewegten Fläche

$$P = 0{,}13 \cdot F \cdot v^2.$$

Für den Fall, daß die Bewegung eine gleichförmige wäre, ergäbe diese Formel einen Druck der Luft auf die Tragflächen (d. h. lediglich infolge der Vibration durch die Kolbenbewegung) von

$$P = 0{,}13 \cdot 30 \cdot 0{,}047^2 \text{ kg oder}$$
$$P = 8{,}6 \text{ g}.$$

Selbst wenn man annehmen muß, daß bei stoßweiser Bewegung der mittlere Druck erheblich höher ist (exakte Messungen über den Luftwiderstand bei beschleunigter Bewegung sind nicht vorhanden. Nach »Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst«, soll dieser Widerstand bis zum Fünffachen des Widerstandes bei gleichförmiger Bewegung steigen können) und außerdem berücksichtigt, daß der Maximalwert den mittleren Wert bedeutend übersteigt, so kommt man doch nicht auf Kräfte, welche gegenüber den oben ermittelten 1320 kg Beschleunigungsdruck eine Rolle spielen. Das Flugzeug verhält sich also in dieser Beziehung, als würde es vollkommen frei in der Luft schweben.

Die zweite Kraft, die das Flugzeug den Vibrationen des Motors entgegenstellt, ist der Beschleunigungswiderstand seiner Masse. Dieser setzt sich zusammen aus der Summe der Beschleunigungswiderstände der einzelnen Teile des Flugzeuges, welche deshalb getrennt zu betrachten sind, weil die Beschleunigungen, welche sie erleiden, verschieden sind. Infolge dieses auftretenden Beschleunigungswiderstandes findet nämlich eine Beanspruchung des Flugzeuggestelles statt, welche bewirkt, daß die mit dem Motor nicht direkt verbundenen Teile geringere Bewegungen ausführen, als die an ihm unmittelbar montierten. Da nun diese Deformationen ihrerseits von den auftretenden Widerstandskräften abhängen, so können elastische Kräfte und die Beschleunigungswiderstände nicht getrennt voneinander untersucht werden. Vielmehr muß zwischen beiden stets die Beziehung bestehen, daß die durch die elastische Formänderung bedingten Kräfte überall gleich dem auftretenden Beschleunigungswiderstand sind.

Ein einfaches Beispiel mag dieses wieder näher erläutern: Die beiden Holme, auf denen der obenerwähnte Motor montiert ist, mögen eine freie Länge von 1,8 m und einen Querschnitt von 40 · 60 mm haben. Die Auflagestellen mögen je in einem Drittel der freien Länge liegen. Die Lagerung ist nicht zu elastisch angenommen, wenn man bedenkt, daß die folgende Untersuchung die Nachgiebigkeit der Verbände, wie z. B. Unterlagsscheiben und des ganzen übrigen Flugzeuges nicht berücksichtigt. Der Beschleunigungswiderstand des übrigen Flugzeuges betrage x kg und greife gleichmäßig an den vier freien Holmenden an. Dann ist jede der vier Auflagestellen des Motors, die den Massendruck übertragen, mit einer Kraft $\frac{x}{4}$ belastet, und wir erhalten für einen Holm das in Fig. 1 dargestellte Kräfteschema. Der Holm erfährt dann eine elastische Formänderung, welche bewirkt, daß sich die beanspruchten Auflagestellen um den Betrag y cm durchbiegen. Infolge dieser Durchbiegung wird nicht mehr die ganze oben errechnete Bewegung auf das übrige Flugzeug übertragen, sondern nur ein Teil davon. Im nachfolgenden werden die Beziehungen zwischen x und y aufgestellt.

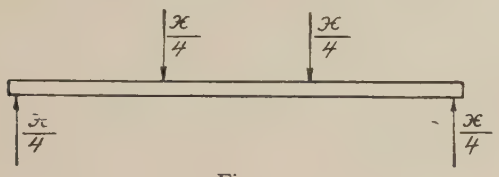

Fig. 1.

Zunächst sei die Gleichung aufgestellt, welche sich aus den Elastizitätseigenschaften des Holmes ergibt. Bedeutet $l = 60$ cm den Abstand der Tragfüße des Motors, $c = 60$ cm die beiderseits überstehenden Holmenlängen, so ist bekanntlich

$$y = \frac{P}{E \cdot J}\left(\frac{c^3}{3} + \frac{c^2 l}{2}\right).$$

Mit

$$P = \frac{x}{4}\text{ kg}, \quad J = \frac{4 \cdot 6^3}{12} = 72\text{ cm}^4$$

und

$$E = 100\,000$$

ergibt sich

$$y = \frac{x}{160} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Mit anderen Maßen wäre allgemein

$$y = \frac{x}{C} \text{ oder } x = C\,y \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Nunmehr müssen die Beziehungen zwischen x und y aufgestellt werden, die sich aus den Beschleunigungswirkungen der Elastizität ergeben.

Wir gehen von dem Augenblicke aus, in dem sich Motor und Flugzeug in ihrer Mittellage befinden. In diesem Augenblick sei die Durchbiegung der Holme $y = 0$. Massenbeschleunigungen sind nicht vorhanden, dagegen haben die Massen ihre größte Geschwindigkeit.

Von diesem Augenblicke an bewegt sich der Motor in verzögerter Bewegung aus der Mittellage. Die Verzögerung wird hervorgerufen erstens durch das Bewegungsgesetz des Kurbeltriebes, zweitens durch die elastische Rückwirkung der Holme, die sich nunmehr durchbiegen. Die erste Verzögerung ist dem Charakter der Sinusschwingung gemäß proportional der Elongation aus der Mittellage. Das gleiche gilt aber auch für die zweite. Wir haben demnach einen Bewegungsvorgang, den man sich durch algebraische Addition zweier Bewegungen entstanden denken kann, die sich in jedem Augenblick in bezug auf Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg proportional sind. Die Bewegung, welche das Flugzeug gleichzeitig ausführt, ist diesen beiden Bewegungen ebenfalls proportional.

Bezeichnen wir mit

s_m und s_f die absoluten Wege (Elongationen) von Motor und Flugzeug, mit

M und M_f deren Massen; mit

y die Durchbiegung des Holmes wie oben, mit

P_e die Erschütterungskraft (Massenkraft) wie oben,

so gilt für die Bewegung des Motors die Gleichung

$$M \cdot \frac{d^2 s_m}{dt^2} = P_e - y \cdot C$$

und für die des Flugzeuges die Gleichung

$$M_f \cdot \frac{d^2 s_f}{dt^2} = y \cdot C.$$

Es ist nun

$$y = s_m - s_f,$$

ferner nach obigem

$$P_e = 4\,M \cdot q \cdot r\,\omega^2 \cos(2\,\omega t).$$

Wir erhalten also die Differentialgleichungen

$$M \cdot \frac{d^2 s_m}{dt^2} = 4\,M \cdot q \cdot r\,\omega^2 \cos(2\,\omega t) - y\,C,$$

$$M_f \cdot \frac{d^2 s_m}{dt^2} - M_f \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = y \cdot C,$$

als deren Auflösungen wir die Werte

$$y = A \cos(2\,\omega t) \text{ und } s_m = B \cos(2\,\omega t)$$

substituieren können.

Es wird also

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -4\,A\,\omega^2 \cos(2\,\omega t),$$

$$\frac{d^2 s_m}{dt^2} = -4\,B\,\omega^2 \cos(2\,\omega t),$$

womit wir erhalten

$$-4\,M\,B\,\omega^2 \cos(2\,\omega t) = 4\,M\,q \cdot r\,\omega^2 \cos(2\,\omega t) - A\,C \cos(2\,\omega t),$$

$$-4\,M_f B\,\omega^2 \cos(2\,\omega t) + 4\,M_f\,A\,\omega^2 \cos(2\,\omega t) = A\,C \cos(2\,\omega t).$$

Diese Gleichungen gelten für alle Werte von t, also auch für

$$\cos(2\,\omega t) = 1,$$

wodurch dieselben sich vereinfachen zu

$$-4\,M\,B\,\omega^2 = 4\,M\,q\,r\,\omega^2 - A\,C$$

und

$$-4\,M_f B\,\omega^2 + 4\,M_f A\,\omega^2 = A\,C.$$

Aus der ersten der beiden Gleichungen folgt:

$$B = \frac{A\,C}{4\,M\,\omega^2} - q \cdot r.$$

Dieser Wert in der anderen eingesetzt, ergibt

$$-\frac{M_f}{M} \cdot A \cdot C + 4\,M_f\,\omega^2\,q \cdot r + 4\,M_f\,A\,\omega^2 = A\,C,$$

$$A = \frac{4\,M_f\,\omega^2\,q \cdot r}{C\left(1 + \frac{M_f}{M}\right) - 4\,M_f\,\omega^2}.$$

Dieser Wert, die größte Durchbiegung des Holmes, wird unendlich groß für

$$\omega = \frac{1}{2}\sqrt{C\left(\frac{1}{M} + \frac{1}{M_f}\right)} = \omega_k,$$

der kritischen Winkelgeschwindigkeit. Man kann daher auch schreiben:

$$A = q \cdot r \cdot \frac{\omega^2}{\omega_k^2 - \omega^2}.$$

Der Faktor $\frac{\omega^2}{\omega_k^2 - \omega^2}$ wird annähernd gleich (-1), wenn ω sehr hoch über ω_k liegt, was praktisch der Fall ist. Für das herangezogene Zahlenbeispiel ergibt sich

$$\omega_k = \frac{1}{2}\sqrt{160\left(\frac{981}{200} + \frac{981}{400}\right)} = 17{,}15,$$

$$\frac{\omega^2}{\omega_k^2 - \omega^2} = \frac{21\,500}{295 - 21\,500} = -1{,}014,$$

so daß der absolute Wert des Vergrößerungsfaktors noch nicht 2% von 1 abweicht. Man kann daher mit sehr guter Annäherung setzen:

$$-A = y_{max} = q \cdot r \text{ und } x = C \cdot q \cdot r = 12 \text{ kg}.$$

Es zeigt sich also, daß nur ein ganz geringer Teil des Massendruckes zur Wirkung auf das Flugzeug gelangt. Insbesondere sind die nach oben gerichteten Beschleunigungskräfte bei weitem nicht so groß, daß sie das Gewicht des Motors aufzuheben vermögen, wodurch ein Richtungswechsel in der Beanspruchung der Befestigungsstellen vermieden wird. Die Verhältnisse nähern sich also mehr den günstigen Verhältnissen des freischwebenden Motors, als denen des völlig starr gelagerten.

Für die Beurteilung der Anwendbarkeit eines ortsfesten Standes ist die Änderung von Belang, die die obigen Resultate erfahren, wenn das Flugzeug gar keine Bewegung ausführen kann. Man erhält diesen Sonderfall, wenn man $M_f = \infty$ setzt. Dadurch ändert sich ω_k nur wenig und die obigen Schlußfolgerungen bleiben bestehen.

Wie man sieht, hat auch die Unsicherheit in der Annahme der Elastizität der Holme auf unsere Folgerungen wenig Einfluß. Sie bewirkt lediglich eine Veränderung von ω_k, die jedoch in dem praktischen Bereich belanglos ist, da die Holme keinesfalls so steif sind, daß ω_k in die Nähe von ω kommt.

Es besteht demnach kein Bedenken gegen die Anwendung ortsfester Rahmen, wenn hinsichtlich der Elastizität die Bedingung erfüllt ist:

Der den Motor tragende Rahmen darf nicht so starr sein, daß er die Vibration des Motors völlig verhindert. Vielmehr müssen die bei Bewegungen des Motors um wenige Millimeter auftretenden elastischen Gegenkräfte noch erheblich kleiner sein, als das Gewicht des Motors.

3. Luftströmung und Belastungsweise.

Die Luftströmungen, denen der Motor bei der Fahrt ausgesetzt ist, haben auf denselben nur insofern einen Einfluß, als der Vorgang der Kühlung von ihnen abhängig ist (soweit sie das Meßverfahren beeinträchtigen können, wird ihr Einfluß weiter unten zu erörtern sein). Die Zufälligkeiten, die durch Böen und seitliche Windstöße entstehen, sind zwar für das Flugzeug von allergrößter Bedeutung, haben jedoch kaum einen Einfluß auf den Motor für sich. Selbst starke Windstöße, welche unmittelbar auf die Auspufföffnungen hingerichtet sind, beeinflussen, wie die Erfahrung zeigt, den Gang des Motors nicht. Der Grund dafür liegt in der großen Geschwindigkeit der Auspuffgase, welche die des stärksten Windes um ein Vielfaches übersteigt (vgl. S. 15). Es bleibt also nur übrig, zu untersuchen, inwieweit die Luftströmung einen Einfluß auf die Kühlung ausübt, und wie der Pendelrahmen beschaffen sein muß, um diesen Einfluß zur Geltung zu bringen.

Die Frage läßt sich nicht erledigen, ohne daß eine Entscheidung über die Art, wie die Kühlung beim Prüfungsbetriebe ausgeführt wird, getroffen ist. Es sind nämlich folgende beiden Möglichkeiten vorhanden: Entweder man kühlt den Motor auf natürliche Art, d. h. bei wassergekühltem Motor durch den vom Motor bewirkten Umlauf von Wasser, das seinerseits in einem dem Motor beigegebenen Kühler zurückgekühlt wird, oder bei luftgekühltem Motor lediglich durch die umgebende Luft. Ferner gibt es für wassergekühlte Motoren die zweite Möglichkeit, daß man künstlichen Wasserumlauf herstellt und dem Motor das Wasser von diesem her zur Verfügung stellt. Es kann dabei sowohl eine Rückkühlung in einer besonderen Kühlanlage, als auch ein Zusatz von Frischwasser erfolgen. Der Umlauf kann durch die Zirkulationspumpe des Motors oder durch eine anderweitige Pumpe bewirkt werden. Dieser letztere Weg weicht zwar stark vom natürlichen Betriebe ab, hat aber große versuchstechnische Vorteile, da es möglich ist, die Temperatur des Wassers beliebig zu regulieren und die Messung der abgeführten Wassermenge genau vorzunehmen. Dadurch ist auch die genaue Bestimmung der abgeführten Wärmemenge ermöglicht.

Die Prüfung mittels Pendelrahmen gestattet ohne weiteres beide Methoden der Kühlung. Es wird deshalb auf diese Umstände hier nur eingegangen, um den Einfluß der Windverhältnisse klarzulegen. Bei der natürlichen Kühlung spielt der Wind eine entscheidende Rolle, und zwar sowohl bei luftgekühlten, als auch besonders bei wassergekühlten Motoren. Während nämlich erstere durch ihre Rotation immer eine gewisse Luftbewegung haben, würde der Kühler der letzteren ohne Wind in völlig unbewegter Luft stehen. Der Wind ist also für den ordnungsgemäßen Betrieb bei natürlicher Kühlung absolut unentbehrlich, und zwar wird man auf dem Prüfstande auch diejenige Luftrichtung wählen, welche beim Fluge die vorherrschende ist, nämlich die in Richtung der Motorachse. Es liegt auf der Hand, daß es vorteilhaft ist, diesen Wind durch die zum Motor gehörige Luftschraube selbst zu erzeugen und den Motor so durch seine eigene Schraube zu belasten.

Freilich ist zu berücksichtigen, daß Motoren mit den normal zu ihnen gehörigen Propellern am ortsfesten Stande nicht ihre volle Tourenzahl und daher auch nicht ihre Höchstleistung entwickeln. Eine geringe Abweichung von der normalen Schraubenform ist daher unerläßlich. Dabei ist eine Verringerung der Steigung weniger zu empfehlen, als die Verkleinerung des Blattes, weil sonst die ohnehin am Stande größere Beanspruchung durch den Propellerzug noch mehr steigt.

Bei der künstlichen Kühlung, wie wir kurz die oben geschilderte zweite Art der Kühlung bezeichnen wollen, läßt sich dagegen immer ein genügendes Maß der Kühlung auch ohne Wind erreichen. Der Wind kann dagegen hierbei die Fehlerquellen der Messung infolge der Kühlung, die er auf die verlängerten Zu- und Ableitungen ausübt, vermehren. Außerdem macht er die Vornahme der Ablesungen beschwerlich. Bei reichlicher Kühlung der wassergekühlten Teile ist dagegen kaum die Gefahr vorhanden, daß solche Stellen des Motors, die keine Wasserkühlung haben, zu heiß werden, sind dies ja doch nur die weniger gefährlichen Stellen. Daher empfiehlt sich bei künstlicher Kühlung die Belastung des Motors durch Windflügel an Stelle der Luftschraube. Windflügel und Luftschraube ähneln sich in bezug auf die Art der Belastung des Motors sehr. Ihre Anwendbarkeit, welche die Belastungsweise des Fahrbetriebes gut nachahmt, bildet einen Hauptvorzug der Pendelrahmen, weshalb andere Belastungsarten ausscheiden.

Bei natürlicher Kühlung der Motoren ist also die Belastung durch Luftschraube, bei künstlicher Kühlung durch Windflügel anzuwenden. Der Pendelrahmen muß geeignet sein, beide Anordnungen zuzulassen. Da Luftschrauben für Flugmotoren bis zu 3,2 m Durchm. vorkommen (größer nur in sehr seltenen Fällen), und der Abstand der äußersten Spitze von festen Flächen zwecks Vermeidung von Luftstößen nach praktischen Erfahrungen mindestens $\frac{1}{4}$ m betragen muß, so soll die Mitte des Motors eine beträchtliche Höhe über Flur haben. Mit Rücksicht auf die Verwendung von Luftschrauben für natürliche Kühlung ist ferner zu beachten, daß die Widerstände, die der Luftstrom durch den Pendelrahmen erfährt, nicht wesentlich größer sein dürfen, als die geringen Widerstände des Flugzeuges. Es ergeben sich demnach folgende Forderungen:

Der Pendelrahmen muß für Luftschraube oder Windflügel einen ausreichenden Spielraum lassen; die Höhe der Motorachse über Fußboden muß mindestens 1,85 m betragen.

Der Pendelrahmen darf den Luftzug in Richtung der Motorachse nicht wesentlich behindern.

4. Schräglagen.

Die Nachahmung der übrigen Betriebsverhältnisse des normalen Flugbetriebes, so z. B. bezüglich der Bedienung und der Betriebsstoffzufuhr führt zwar zu gewissen Komplikationen der Meßgeräte und sonstigen Prüfungseinrichtungen, liefert aber keine besonderen Konstruktionsbedingungen für den Pendelrahmen selbst. Dagegen ergeben sich Schwierigkeiten, wenn man die Forderung erhebt, daß die Prüfung auch unter den besonderen Betriebsumständen möglich sein soll, welche beim Flugmotorenbetrieb nur vorübergehend auftreten. Noch bis vor kurzem hat man diese Forderung nicht erhoben. Nachdem aber jetzt einige Konstruk-

tionen bestehen, welche sie in gewisser Hinsicht erfüllen, kann ein Pendelrahmen nur dann in Wettbewerb treten, wenn er auch hierin mindestens das gleiche leistet.

Es handelt sich dabei in erster Reihe um den Betrieb in Schräglagen.. Dieselben kommen beim Flugzeugmotor beim Aufstieg und beim Abstieg vor und übertreffen an Größe der Neigung alles, was andere Maschinen auszuhalten haben. Es erscheint daher gerechtfertigt, daß viele neueren Prüfstände Einrichtungen zur Schrägstellung der Motoren vorsehen. So gestattet der Prüfstand, der 1911 im englischen Motorwettbewerb benützt wurde, eine Schrägstellung von 15° nach beiden Richtungen. In den Bestimmungen des Wettbewerbes um den ersten Kaiserpreis wurde gefordert, daß eine Neigung von 10° aufwärts sowie eine solche von 15° abwärts möglich sein muß. Die damit verknüpften Bedingungen über gleichzeitige Drosselung usw. sind hier belanglos; für den Pendelrahmen handelt es sich nur darum, die vorgeschriebene Neigung zu ermöglichen. Es sei darauf hingewiesen, daß diese Neigungen wohl für normale Verhältnisse reichlich bemessen sind, aber bei weitem nicht an das Maximum heranreichen, das im praktischen Betriebe vorkommt. Bei den sog. Sturzflügen durchschneidet die Maschine fast senkrecht die Luft,

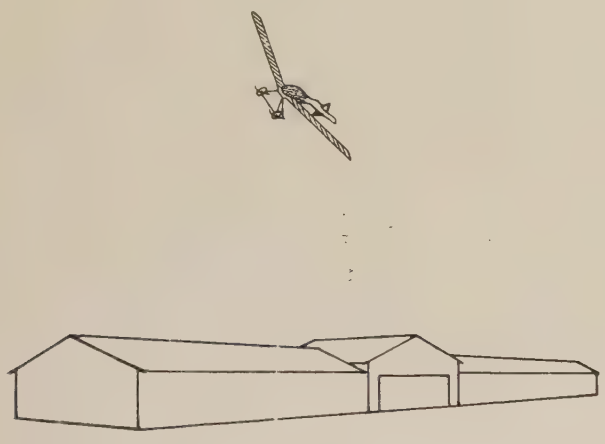

Fig. 2.

und dieses waghalsige Kunststück, das schon manchem das Leben gekostet hat, wird leider immer wieder von neuem ausgeführt. Neuerdings sind sogar Rückenflüge in Aufnahme gekommen, so daß jede Neigung bis zur Umkehrung vorkommt. Es wäre jedoch zu weitgehend, wenn man derartige Akrobatenkunststücke den Prüfungsbedingungen zugrunde legen wollte.

Neben der Schrägstellung der Motorachse kommt jedoch auch eine Schrägstellung des Motors senkrecht dazu, d. h. eine Schwenkung um die Motorachse in Frage. Derartige Schräglagen treten sowohl bei gelegentlichen Schwankungen des Flugzeuges als auch in besonders starkem Grade in Kurven auf. Geschickte Flieger nehmen heutzutage schon Kurven von so geringem Krümmungsradius, daß dabei eine Schrägstellung des Flugzeuges von 30° und mehr auftritt. Fig. 2 zeigt die starke Schrägstellung eines von Fokker gesteuerten Apparates in einer Kurve nach einer photographischen Aufnahme auf dem Flugplatz Johannisthal. Freilich wirkt in einem solchen Falle die Zentrifugalkraft in dem Sinne, daß die Schrägstellung gegen die Richtung der Schwerkraft nicht voll in Erscheinung tritt. Doch ist leicht einzusehen, daß dieser Einfluß die Abweichung von der Normallage bei weitem nicht völlig aufhebt.

Die seitliche Neigung bringt nun für den Betrieb des Motors ganz dieselben Gefahren mit sich, wie die Neigungen nach vorn oder hinten. Es ist deshalb genau so berechtigt, die Prüfung mit seitlicher Neigung vorzuschreiben, wie mit Neigung nach vorn und hinten.

Der Einfluß, den die Schrägstellung haben kann, hängt von der Konstruktion des Motors ab, und zwar ist hauptsächlich die Ausbildung der Öl- und Benzinbehälter und Leitungen maßgebend. Es ist z. B. ein Konstruktionsfehler, wenn das Reservoir, aus dem die Ölpumpe ansaugt, bei einer der vorkommenden Schräglagen leerlaufen kann. Fig. 3 zeigt einen wie gewöhnlich als Ölbecken verwandten Kurbelkasten ohne Rippen unter 15° Neigung. Man sieht, daß der hintere Teil des Motors leerläuft, so daß die letzten Zylinder ungenügend geschmiert sind. In Fig. 4 sehen wir denselben Behälter mit Rippen, die auf einfache Weise diesem Übelstande abhelfen.

Auch die Zuführung des Benzins zum Vergaser kann durch die Schrägstellung des Motors ähnlich beeinträchtigt werden. Bei der großen Verschiedenheit der Anordnungen

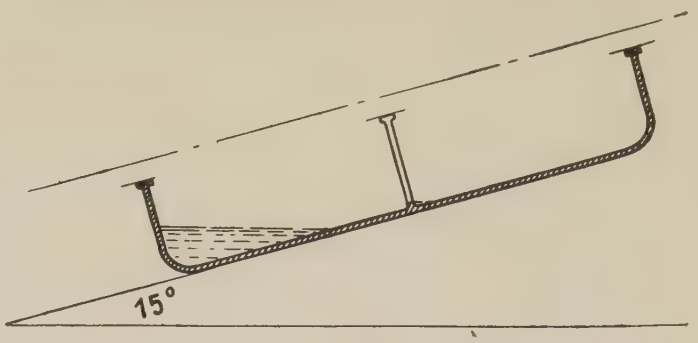

Fig. 3.

der Benzinbehälter und Vergaser kann nicht ohne weiteres angegeben werden, nach welcher Richtung die Schrägstellung besonders gefährlich ist. Ferner erfahren die Lagerdrücke usw. Richtungsänderungen.

Um in jedem Falle die Prüfung, ob etwa ein diesbezüglicher Konstruktionsmangel vorliegt, zu ermöglichen, hat der Pendelrahmen die Forderung zu erfüllen:

Der Pendelrahmen muß die Schrägstellung der Motoren nach allen Richtungen um diejenigen Winkel zulassen, welche im praktischen Flugbetriebe vorkommen.

Zurzeit dürften Winkel an ca. 30° in Frage kommen, wenn man von den oben erwähnten vereinzelt vorkommenden Kunstflügen absieht.

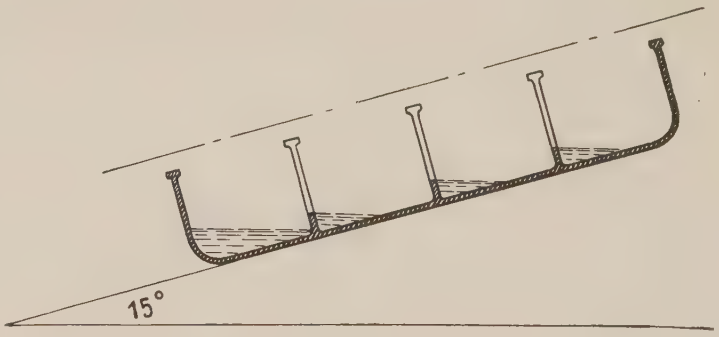

Fig. 4.

5. Änderung des Luftzustandes.

Die Veränderungen des Luftzustandes, mit denen der Flugmotor zu rechnen hat, sind ebenfalls bedeutender als die, welche für andere Kraftmaschinenarten in Betracht kommen. Sind doch bereits Höhen von 6000 m, in denen der Luftdruck nur noch 0,46 Atm. beträgt, längst überschritten worden; desgleichen sind erhebliche Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit und in der Temperatur beim Wechsel der Fahrthöhe oder beim Umschlagen der Witterung keine Seltenheiten.

Der Einfluß, den so starke Veränderungen auf den Motor ausüben, ist ganz bedeutend, wie ich in meinem Aufsatz »Der Einfluß des Luftzustandes auf die Flugmotoren« näher ausgeführt habe, und zwar muß hier noch besonders erwähnt werden, daß dieser Einfluß nicht lediglich in einer Verminderung der Leistung proportional zur Luftdichte besteht, wie einige Autoren annehmen (vgl. H. André, Monteurs d'Aviation et de Dirigeables).

Es ergibt sich demnach der Wunsch, die Veränderungen des Luftzustandes auch auf dem Prüfstande vornehmen zu können. Bisher ist dieses noch nicht versucht worden. Es

dürfte jedoch keine besondere Schwierigkeit bestehen, sowohl Temperatur als auch Luftdruck beliebig zu variieren, wenn man den Motor in eine luftdicht geschlossene Kammer einschließt. Da man brauchbare Resultate nur erhält, wenn sowohl die Belastungs- als auch die Arbeitsluft in gleicher Weise verändert wird, so genügt es nicht, den Motor allein in die Kammer zu setzen, sondern dieselbe wird auch die Windflügel mitumfassen müssen. Die Verwendung von Luftschrauben ist auch in diesem Falle weniger zu empfehlen, da sie die ständige Zufuhr großer Mengen von Frischluft, die auf den künstlichen Luftzustand gebracht werden muß, erfordert und so zu sehr kostspieligen und schwierigen Anlagen führt.

Mit Bezug auf den Pendelrahmen ergeben sich zwei Möglichkeiten. Entweder ragen nur die den Motor unmittelbar tragenden Teile in die luftdichte Kammer hinein, oder der gesamte Pendelrahmen mit Fundament und Meßvorrichtungen steht in der Kammer. Der letztere Weg ist zwar auch möglich, aber weniger zu empfehlen, weil es doch wünschenswert ist, daß die Meßvorrichtungen jederzeit zugänglich sind und die Luftkammer keine unnötige Größe erhält. Es ergibt sich daher für den Pendelrahmen, wenn auch nicht als kategorische Forderung, so doch als wünschenswerte Eigenschaft:

Der Pendelrahmen soll tunlichst die Einschließung des Motors und der zugehörigen Windflügel in einer luftdichten Kammer gestatten, in welche jedoch nur die den Motor unmittelbar tragenden Teile des Pendelrahmens hineinragen.

B. Messungen.

a) Das Drehmoment.

Die wissenschaftliche Prüfung von Motoren kann sich natürlich nicht lediglich auf die Beobachtung unter den für die Praxis maßgebenden Betriebsverhältnissen, welche zu den im vorigen Abschnitt erörterten Konstruktionsbedingungen für den Pendelrahmen führen, beschränken, sondern wird zu gleicher Zeit genaue Messungen aller derjenigen Größen erfordern, die ein Maß für die Güte des Motors liefern. Hierzu gehört das Drehmoment, dessen Bestimmung die eigentliche Sonderaufgabe des Pendelrahmens darstellt. Das Grundprinzip dieser Messung ist bereits in der Einleitung gekennzeichnet worden.

1. Lage der Drehachse.

So einfach dieses Prinzip erscheint, so schwierig ist es doch, eine Anordnung zu finden, die seine Anwendung gestattet, ohne daß erhebliche Fehler die Messung stören. Von grundsätzlicher Bedeutung ist dabei die Lage der Drehachse des Pendelrahmens zur Drehachse des Belastungswiderstandes, d. h. bei Motoren ohne Übersetzungstriebe zur Motorwelle. Diese gegenseitige Lage beeinflußt die gesamte Konstruktion des Pendelrahmens so stark, daß sie im zweiten Teile dieser Arbeit der Einteilung der verschiedenen Pendelrahmenbauarten zugrunde gelegt werden soll.

Der allgemeinere Fall ist der, daß die beiden Achsen nicht zusammenfallen. Die Motorwelle ist in Fig. 5 mit M, die Schwenkachse des Pendelrahmens mit C bezeichnet. Das Drehmoment werde beispielsweise durch ein Gewicht Q, welches am Pendelrahmen mit dem Hebelarm a angreift, ausgewogen. Die Messung ist korrekt, solange der an den Windflügeln F_1 und F_2 angreifende Luftwiderstand tatsächlich ein reines Drehmoment ist und andere äußere Kräfte auf das pendelnde System nicht wirken. Diese Bedingungen werden jedoch in Wirklichkeit nie erfüllt. Der Luftwiderstand z. B. ergibt infolge geringer Unsymmetrien der Flügel mit Bezug auf die Motorwelle außer einem Drehmoment noch eine Einzelkraft, deren Richtung ständig umläuft und mit Bezug auf die Achse C ein zusätzliches Drehmoment gibt, das die Messung verfälscht. Zwar wird dieses Fehlerdrehmoment bei jeder Umdrehung zweimal gleich o und ändert sein Vorzeichen, doch sind diese Augenblicke der Ablesung nicht zugänglich. Auch zahlreiche andere Ursachen, wie z. B. die Massenstöße, bewirken ein scheinbares Schwanken des Drehmoments. Die Messung kann daher nur auf der durchschnittlichen Einstellung der Wägevorrichtung während einer gewissen Zeitdauer beruhen, und in der Tat ändern die ebengenannten Schwankungen den Mittelwert des Drehmomentes nicht. Praktisch erreicht wird diese durchschnittliche Einstellung durch geeignete Dämpfung der Meßinstrumente und durch interpolierendes Ablesen. Es kann jedoch überdies der Fall eintreten, daß infolge unsymmetrischer Raum- oder Windverhältnisse die Einzelkraft während des Umlaufes ihre Größe ändert und daher auch der Mittelwert kein richtiges Maß für das reine Drehmoment ergibt. Ferner können noch andere Kräfte auftreten wie die Auspuffreaktion (vgl. S. 14), Drücke aus den Betriebsstoffleitungen u. a. m., welche dauernd in einseitigem Sinne wirken. Daher ist die Anzeige in diesem allgemeinen Falle mit einem Fehler behaftet, der um so größer ist, je größer der Abstand von M und C gewählt wird. Es kommt dazu der weitere Nachteil, daß das Schwanken des Fehlerdrehmoments die Erschütterungen vermehrt und dadurch nicht nur Motor und Pendelrahmen ungünstig beansprucht, sondern auch die Ablesung erschwert.

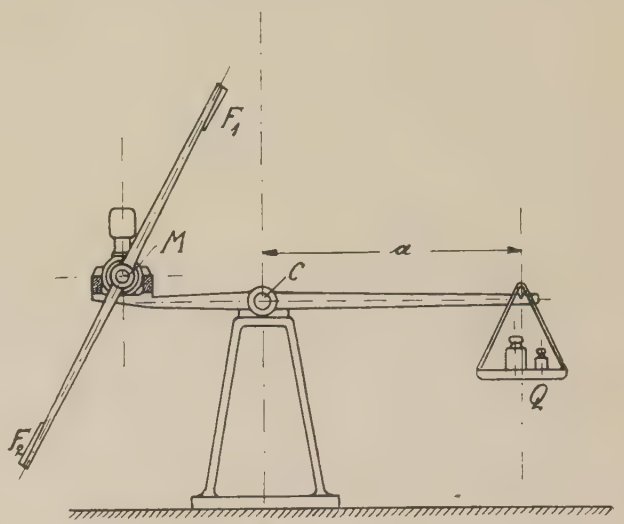

Fig. 5.

Für die Verwendung von Luftschrauben gilt natürlich genau die gleiche Überlegung.

Der nächstliegende Weg, die Anzeige des Drehmoments mathematisch korrekt zu gestalten, ist der, die Achsen C und M zusammenfallen zu lassen. So erwünscht dieses nach den voraufgegangenen theoretischen Erwägungen erscheinen mag, so unerwünscht ist es nach praktischen, konstruktiven Gesichtspunkten. Die Lagerstellen des Pendelrahmens sind schwer unterzubringen, ohne daß sich für die Aufstellung des Motors Schwierigkeiten ergeben. Die einzelnen Mißstände, zu denen man bei der Durchkonstruktion des Prinzips gelangt, lassen sich nur genau an Hand der betreffenden Einzelkonstruktion nachweisen. Das soll weiter unten im Teil II geschehen. An dieser Stelle sei nur auf das dort gewonnene Resultat verwiesen, daß bisher keine Konstruktion dieser Art bekannt wurde, welche von erheblichen Mißständen frei ist. Die Forderung:

Der Pendelrahmen muß die Ablesung des erzeugten Drehmoments ungestört durch etwa auf die Drehachse wirkende Einzelkräfte gestatten,

läßt sich daher scheinbar nicht mit sämtlichen übrigen Forderungen vereinbaren. Trotzdem findet sich ein Ausweg, der am Schluß dieser Arbeit des näheren beschrieben wird.

2. Fehlerquellen des Motors.

Weitere Fehlerquellen können für die Messung daraus entstehen, daß beim Motorbetriebe noch andere Drehmomente auftreten als das nutzbare des Luftwiderstandes, welches gemessen werden soll, und zwar kommen dabei folgende Kraftwirkungen in Betracht:

1. Die Reaktion der Auspuffgase,
2. die Wirkung des Schraubenstrahls auf Motor und Pendelrahmen,

3. Kräfte aus dem Bedienungsgestänge,
4. Kräfte aus den Betriebsstoffleitungen.

Das von dem Rückdruck der Auspuffgase hervorgerufene Drehmoment wurde bis vor kurzem regelmäßig vernachlässigt. Es soll daher im folgenden gezeigt werden, daß dieses zu erheblichen Fehlern in der Pendelrahmenmessung führen muß.

Der Rückdruck, den der Motor infolge des Auspuffs erfährt, ist offenbar gleich der Summe derjenigen Kräfte, welche notwendig sind, um den den Motor verlassenden Rauchgasen ihre Geschwindigkeit zu erteilen.

Bedeutet

P den Rückdruck in kg,
Q das Gewicht der Rauchgase in kg,
q dasselbe bezogen auf die Zeiteinheit in kg/sec,
c_m die Geschwindigkeit der Rauchgase in m/sec,

so ist

$$P = \frac{q}{g} \cdot c_m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Die Größe q ist leicht zu ermitteln. Bezeichnet

l die sekundlich angesaugte Luftmenge,
b die sekundlich verbrannte Brennstoffmenge, beide in kg/sec,
v_h das Hubvolumen aller Zylinder in cbm,
n die Tourenzahl pro Minute,
η_l den Lieferungsgrad,
γ das spezifische Gewicht der angesaugten Luft in kg/cbm,
p_m den mittleren effektiven Arbeitsdruck in Atm.,
N die Nutzleistung in PS,

so ist

$$q = l + b.$$

Ferner

$$l = v_h \cdot \frac{n}{2 \cdot 60} \cdot \eta_l \cdot \gamma,$$

und

$$N = v_h \cdot p_m \cdot 10000 \cdot \frac{n}{2 \cdot 60} \cdot \frac{1}{75},$$

daraus folgt

$$\frac{l}{N} = \frac{75}{10000} \cdot \frac{\eta_l \cdot \gamma}{p_m}.$$

Sind die Größen η_l, γ, p_m nicht weiter bekannt oder gemessen, so kann man für Flugmotoren im Mittel annehmen

$$\eta_l = 0{,}7, \quad \gamma = 1{,}29, \quad p_m = 7{,}5.$$

Mit diesen Werten ergibt sich die sekundliche pro Pferdekraft angesaugte Luftmenge mit 0,903 g. Ist über den Brennstoffverbrauch auch nichts näheres bekannt, so kann man unter Zugrundelegung eines Verbrauches von 230 g für die PS-Stunde mit 0,064 g für die PS-sec rechnen. Das ergibt zusammen

$$q = 0{,}967 \cdot N,$$

so daß aus Gleichung (1) folgen würde

$$P = \frac{0{,}99}{10000} \cdot c_m \cdot N \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Sind die einzelnen Größen jedoch abweichend von den oben eingesetzten Zahlen bestimmt worden, so hat man diese in die unausgerechnete Formel

$$P = \left(\frac{75 \gamma \eta_l}{10000 \, p_m} + b \right) \frac{N}{g} \cdot c_m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

einzusetzen.

Nicht ganz so einfach ist die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit c_m. Würde tatsächlich beim Ausströmen die gesamte Wärmeenergie der Auspuffgase in Strömungsenergie umgesetzt werden, wie Güldner allgemein für Verbrennungsmotoren annimmt (2. Auflage S. 176 Z. 3), so würde das unter Zugrundelegung eines Verlustes durch die Abwärme der Rauchgase von 30% eine Ausströmungsgeschwindigkeit von über 1300 m/sec ergeben. Da diese Geschwindigkeit die kritische bei weitem übersteigt, könnte sie nur erreicht werden, wenn die Auspuffsöffnungen die Form von vollkommenen Düsen hätten. Bedenkt man jedoch, daß die Expansion am Auslaßventil b ginnt, so wird man namentlich für die geringeren Erhebungen des Ventiltellers zugeben müssen, daß eine gewisse Erweiterung des Strahlquerschnittes bis zum Ende des Auspuffkanals stattfindet. Anderseits werden durch die scharfen Krümmungen auch erhebliche Geschwindigkeitsverluste eintreten können. Die nachfolgenden Erörterungen legen die Annahme zugrunde, daß der Auspuff genau so vor sich geht, als wenn der Druckraum durch eine einfache aber verlustfreie Mündung direkt in die Atmosphäre ausblasen würde. Zweifellos trifft diese Annahme nicht zu. Sie wird aber dadurch gerechtfertigt, daß sie brauchbare Zahlenwerte ergibt, welche von denen der praktischen Messung wenig abweichen. Der Unterschied zwischen obiger Annahme und den wirklichen Verhältnissen kann daher, wenn genügend sichere Versuchsdaten vorliegen, durch einen Korrektionsfaktor ausgeglichen werden.

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Beurteilung der Temperatur der Auspuffgase. Soweit überhaupt Angaben darüber vorhanden sind, beziehen sich dieselben auf einen Mittelwert. Zweifellos ändert sich jedoch die Temperatur während der Auspuffperiode. Glücklicherweise ist selbst eine Änderung der Temperatur um 200° auf das Endresultat von geringem Einfluß, weshalb die Annahme einer konstanten Temperatur der Rauchgase zulässig erscheint.

Der Exponent der Adiabate wurde mit 1,37 angenommen; dann ergibt sich das kritische Druckverhältnis ε zu 0,534 und der kritische Druck im Zylinderinnern bei einem Außendruck von 1 Atm. zu 1,87 Atm. Nach der oben gemachten einfachen Annahme über den Auspuffsvorgang erstreckt sich natürlich das Zylinderinnere bis an die Mündungsebene des Auspuffrohres. Übersteigt der Innendruck p_1 den Wert 1,87, so steigt auch der Mündungsdruck p_0, so daß das Verhältnis beider das kritische bleibt. Diese Abhängigkeit ist in Fig. 6, in der die Abszissen den Zylinderdruck angeben, durch eine gebrochene Gerade dargestellt.

Da aus dieser Geraden für jeden Innendruck der Mündungsdruck bekannt ist, kann die zugehörige Mündungsgeschwindigkeit nach der bekannten Formel

$$c = \sqrt{2 g \frac{k}{k-1} P \cdot v \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

errechnet werden. Dieselbe ist dazu zweckmäßig in folgender Weise zu vereinfachen: man setzt

$$P = p_1 \cdot 10000,$$

$$v = v_0 \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}},$$

$$A = \sqrt{2 g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{10000}{\gamma}}$$

und erhält

$$c = A \cdot \sqrt{p_1 \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - p_0}.$$

Für

$$p_1 < 1{,}87 \text{ wird } p_0 = 1 \text{ und}$$

$$c = A \cdot \sqrt{p_1^{\frac{k-1}{k}} - 1} = 1480 \sqrt{p_1^{2{,}7} - 1}.$$

Für

$$p_1 > 1{,}87 \text{ wird } p_0 = \varepsilon \cdot p_1 \text{ und}$$

$$c = A \sqrt{p_1 \left(\varepsilon^{\frac{1}{k}} - \varepsilon \right)} = 1480 \sqrt{0{,}098 \, p_1}.$$

Diese Funktion ist auch in Fig. 6 dargestellt, und zwar wurde der Berechnung ein spezifisches Gewicht der Rauchgase von 0,33 kg/cbm zugrunde gelegt.

Schließlich ist auch noch die Funktion $dQ = f(p)$ aufgetragen. Dieselbe ist proportional c und p_0, wenn man die Temperatur und Zusammensetzung der Gase als konstant und von den übrigen Größen unabhängig annimmt. Der Maßstab

von dQ ist beliebig, er könnte durch Integration bestimmt werden, da Q bekannt ist.

Um nun die Abhängigkeit derselben Größen von der Zeit festzustellen, ist es notwendig, die Änderung des Druckes während der Auspuffperiode zu kennen. Fig. 7 zeigt den Teil eines Zylinderdiagramms, der den Auspuff umfaßt. Der Auspuff eröffnet 15% vor der unteren Totlage. Es wird angenommen, daß selbst, wenn ein Nachschluß des Ventils stattfindet, das Ausströmen des Rauches mit der Erreichung der halten, je genauer das spezielle Zylinderdiagramm aufgenommen oder theoretisch geschätzt wurde.

Der Druckverlauf des Diagramms Fig. 7 ist in Fig. 8 als Funktion des Kurbelweges oder, was bei gleichförmiger Drehung dasselbe ist, als Funktion der Zeit aufgetragen. Auf Berücksichtigung der endlichen Schubstangenlänge und der Desachsierung konnte bei dieser überschlägigen Untersuchung um so mehr verzichtet werden, als beide Größen fast für jeden Flugmotor andere sind. Mit Hilfe der Kurven aus

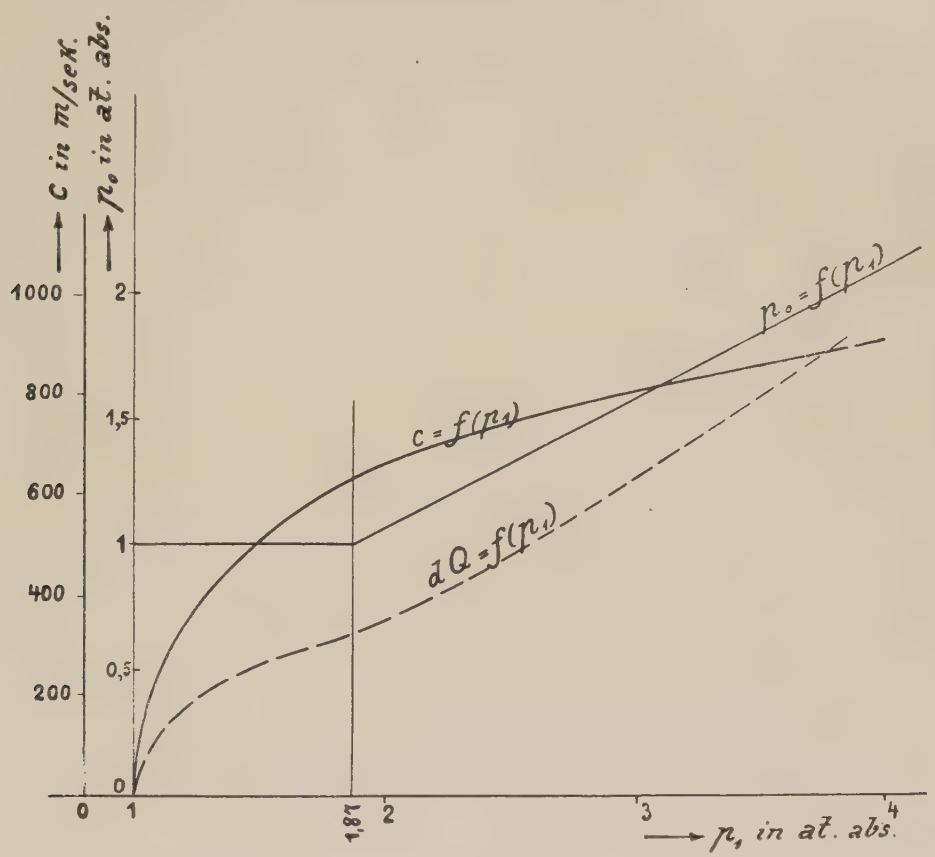

Fig. 6.

oberen Totlage aufhört. Das Diagramm wird den folgenden Untersuchungen zugrunde gelegt. Selbstverständlich gelten die daraus abgeleiteten Zahlenresultate nur dann, wenn der Verlauf des Auspuffs tatsächlich diesem Normaldiagramm entspricht. Die Änderung der Steuerpunkte, des Kompressionsverhältnisses, des thermischen Verlaufes des Arbeitsvorganges usw. bleiben demnach nicht ohne Einfluß auf das weiter unten ermittelte Resultat. Wem aber die durch dieses Normaldiagramm erreichte Annäherung nicht genügt, der kann für jeden Spezialfall die folgenden Untersuchungen besonders durchführen, und wird dabei um so genauere Resultate erFig. 6 ist dann auch die Geschwindigkeit c und die augenblickliche Rauchgasmenge dQ als Funktion der Zeit aufgetragen. Durch Multiplikation der Ordinaten der letzten beiden Kurven und Wahl eines beliebigen Maßstabes ergibt sich schließlich noch die Kurve $dQ \cdot c$.

Die Integration der unter den Kurven dQ und $dQ \cdot c$ liegenden Flächen ergibt unter Berücksichtigung der gewählten Maßstäbe eine in die Rechnung einzusetzende mittlere Geschwindigkeit c_m von 548 m/sec. Wenn mit dieser Größe im folgenden durchweg gerechnet wird, so soll damit nicht einmal gesagt sein, daß sie für alle Motoren bei glei-

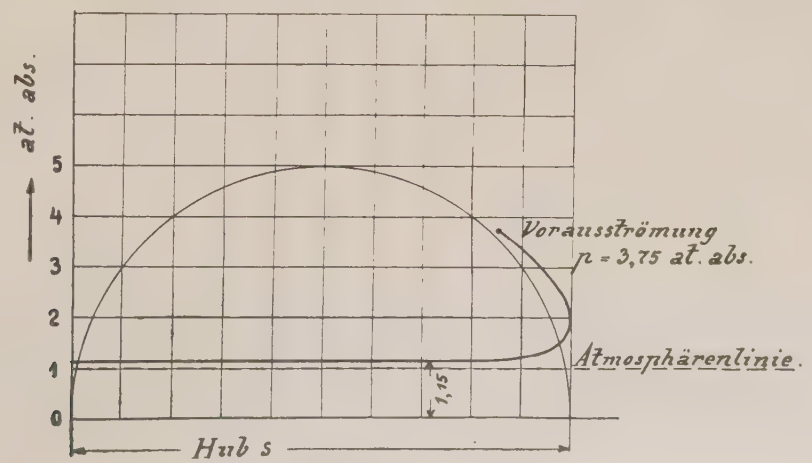

Fig. 7.

chem Zylinderdiagramm zutrifft: Im Gegenteil, sie ist nur ein Näherungswert für normallaufende Flugmotoren der gegenwärtigen deutschen Bauart. Veränderungen der Zusammensetzungen der Rauchgase, ihrer Temperatur, der Form der Auspufföffnungen usw. werden diese Größe erheblich verändern können. Halten wir aber zunächst an dem ermittelten Werte fest, so ergibt sich aus Gleichung (2) für normale Verhältnisse unter den gemachten Annahmen der mittlere Druck

$$P = 0{,}054 \cdot N \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Es ist nun festzustellen, inwieweit die bisherigen Erfahrungen mit unserem Resultate übereinstimmen. Leider fehlt es bisher an exaktem Material über diesen Gegenstand, da die Messungen an Motoren sowohl hinsichtlich ihres Drehmomentes, als auch ihres Axialschubes entweder einschließlich oder unter Ausschaltung des Auspuffdruckes vorgenommen werden, nicht aber beide Messungen gleichzeitig, und doch wäre das letztere notwendig, um die Größe des Auspuffdruckes festzustellen.

Eine solche doppelte Messung hat jedoch, freilich aus ganz anderen Gründen und unter verschiedenen das Resultat trübenden Nebenumständen, bei der Durchführung des Wettbewerbes um den Kaiserpreis für den besten deutschen Flugzeugmotor stattgefunden. Die Einzelheiten der dabei angewandten Meßverfahren sind durch die Veröffentlichungen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt bereits bekannt. Hier sollen noch einmal kurz die Punkte zusammengestellt werden, welche für den vorliegenden Zweck in Betracht kommen.

Das Drehmoment des Motors wurde während des Hauptversuches durch Auswägen auf einem Pendelrahmen gemessen. Der Preisverteilung wurde dagegen dasjenige Drehmoment zugrunde gelegt, das für die Schraube bei der mittleren Tourenzahl des Hauptversuches durch einen besonderen Versuch unter elektrischem Antriebe bestimmt worden war. Bei dieser letzteren Messung war die Wirkung der Rauchgase ausgeschaltet, während dieselbe bei der Pendelrahmenmessung voll zur Wirkung kam. Es ist deshalb zu erwarten, daß die Resultate bei elektrischem Antriebe und bei Antrieb durch Benzinmotor um den Betrag differieren, der auf das Konto des Auspuffs zu schreiben ist. Getrübt wird diese Sachlage hauptsächlich durch drei Umstände:

1. Nach dem übereinstimmenden Urteil der sachverständigsten Propellerfabrikanten verhalten sich die Luftschrauben beim Antrieb durch einen gleichförmig laufenden Elektromotor günstiger als beim Antriebe durch einen Benzinmotor.

2. Zum Anschluß an den Elektromotor mußte die Schraube um ein mehr oder minder großes Stück vom Motor entfernt werden, wodurch die Bestimmung des vom Schraubenstrahle auf den Motor ausgeübten Drehmoments, das ja ebenfalls in die Rechnung eingeht, an Genauigkeit einbüßt.

3. Die Unempfindlichkeit des Pendelrahmens war erheblich, namentlich die Austarierung im Ruhezustande schloß Nullpunktsfehler von fast 1 mkg nicht aus.

Danach wird es verständlich, daß die Differenzen zwischen beiden Meßmethoden die zahlenmäßige Errechnung des Auspuffdruckes allgemein nicht zulassen. Von seiten der Versuchsanstalt sind die Versuchsresultate von 15 Motoren, welche den Hauptversuch bestanden haben, veröffentlicht worden. Die Drehmomente derselben liegen zwischen 28,8 und 57,1 mkg. Die Abweichungen von der Pendelrahmenmessung betragen 0 bis 6,6% und liegen in allen Fällen in der Richtung des vom Auspuff hervorgerufenen Drehmomentes, obgleich beide Drehsinne der Auspuffwirkung vorkommen. Dieser Umstand läßt vermuten, daß dem Auspuff der Löwenanteil an dieser Differenz zuzuschreiben ist. Bei der erheblichen Unempfindlichkeit des Pendelrahmens ist einiger Erfolg von der Nachrechnung nur in den Fällen zu erwarten, in denen die Differenz mehr als 1 mkg betrug. Das war bei 4 Motoren der Fall,

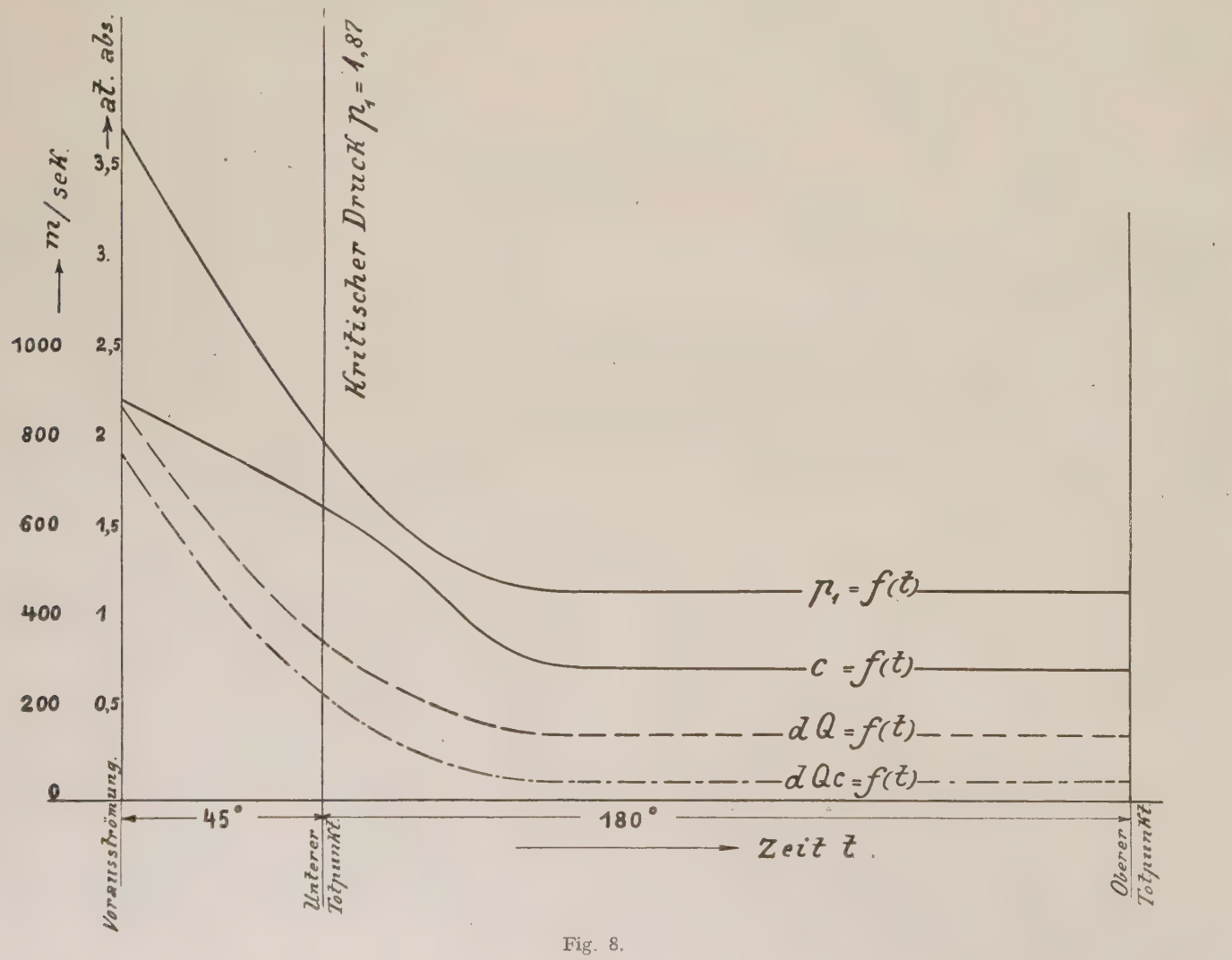

Fig. 8.

welche sämtlich von verschiedenen Firmen stammten und demgemäß abweichende Bauarten besaßen. In der untenstehenden Tabelle 1 sind die Motoren nach der Größe der Meßdifferenz geordnet aufgeführt und mit den Buchstaben A bis D bezeichnet. Die Spalte 1 gibt die Meßdifferenz in mkg an, die Spalte 2 zeigt dasjenige Drehmoment, daß der nach Gleichung (4) errechnete Auspuffdruck unter Berücksichtigung des jeweiligen Hebelarmes der Auspuffrichtung mit Bezug auf die Motorachse ergibt. In Spalte 3 ist dann als Differenz zwischen Spalte 1 und 2 diejenige Unstimmigkeit verzeichnet, welche nach Berücksichtigung der Auspuffreaktion in der von uns angegebenen überschlägigen Weise noch verbleibt.

Tabelle 1.

	1	2	3
A	3,3	2,5	0,8
B	2,5	3,1	0,6
C	2,2	2,5	0,3
D	1,4	2,0	0,6

Wir sehen, daß in allen vier Fällen die Unstimmigkeit so gering wird, daß sie sich zwanglos durch die obengenannten weiteren Fehlerquellen erklären läßt. Beim Motor A ergibt unsere Formel einen zu kleinen, bei den übrigen drei Motoren einen zu großen Wert. Die Größenordnung ist also zweifellos die richtige. Es sei dazu noch bemerkt, daß es keinen wesentlichen Unterschied macht, wenn man statt mit der Formel (4) mit der etwas genaueren Formel (3) rechnet.

Nach neueren Versuchen der Deutschen Versuchsanstalt soll das Drehmoment der Auspuffgase bei den größten vorkommenden Hebelarmen der Auspuffrichtung 6% des Motordrehmomentes betragen. Vergleichen wir damit unsere Formel: Der größte Hebelarm der gegenwärtigen deutschen Bauarten beträgt 0,6 m. Das ergibt einen Auspuffdrehmoment von $0{,}6 \cdot 0{,}054 = 0{,}0324$ mkg für 1 PS. Bei der üblichen Tourenzahl von ungefähr 1350 Umdr./Min. entspricht einer Pferdekraft ein Drehmoment von 0,53 mkg. Davon ist die obige Auspuffreaktion 6,1%. Die Übereinstimmung ist also eine sehr gute, und wir können, bis genauere Resultate bekannt sind, mit unserer Überschlagsformel rechnen.

Es besteht daher die Möglichkeit, den Fehler der Auspuffreaktion mit genügender Genauigkeit auf rechnerischem Wege zu eliminieren, so daß besondere konstruktive Maßnahmen für den Pendelrahmen nicht unbedingt notwendig werden. Immerhin ist es zur Erzielung noch größerer Genauigkeit sowie zur experimentellen Bestimmung des Auspuffdruckes selbst doch wünschenswert, die Pendelrahmenmessung auch so vornehmen zu können, daß das Auspuffdrehmoment nicht mitgemessen wird. Ein naheliegender Ausweg besteht darin, daß man die Auspuffgase durch einen Auspufftopf oder wenigstens ein vor der Auspufföffnung befindliches Schild auffängt bzw. parallel zur Drehachse ableitet. Dieser Ausweg darf jedoch nicht gewählt werden, wenn nicht besondere Vorkehrungen für den Nachweis getroffen sind, daß hierdurch der Arbeitsvorgang im Motor nicht beeinflußt wird. Es kann dieses leicht, z. B. infolge Erhöhung des Ausschubwiderstandes der Fall sein, und es empfiehlt sich nicht, solche Komplikationen in das Prüfungsverfahren hineinzubringen. Ein anderer Ausweg besteht darin, daß man das Drehmoment zweimal mißt, wobei der Auspuff jedesmal bezüglich der Drehachse einen anderen Hebelarm hat. Diese Lösung ist fehlerfrei. Sie ergibt mit Bezug auf den Pendelrahmen den Wunsch:

Der Pendelrahmen soll die Messung des Drehmomentes so gestatten, daß eine Veränderung des Hebelarmes der Auspuffrichtung mit Bezug auf die Pendelachse möglich ist.

Noch bedeutender als die oben errechneten Fehlerquellen ist oft diejenige, welche bei Verwendung von Luftschrauben infolge der drehenden Bewegung des Luftstromes auftritt. Würde sich die umgebende Luft zur Luftschraube wie eine geradlinig geführte Mutter aus festem Material zu ihrer Schraubenspindel verhalten, so wäre eine solche Drehbewegung nicht vorhanden, und man könnte aus der Steigung der Schraube die Geschwindigkeit des Windstromes einfach errechnen. Würde sich dagegen die Luft zur Schraube wie eine nichtgeführte Mutter aus festem Material verhalten, so würde eine fortschreitende Bewegung überhaupt nicht stattfinden, sondern lediglich eine rotierende. Falls äußere Widerstände vorhanden wären, würde das Verhalten ein mittleres sein, die Luftmutter würde teilweise von der Rotation mitgenommen werden, teilweise in der Rotation gegen die Schraube zurückbleiben und infolgedessen vorwärtsgleiten. Dieser letztere Fall entspricht dem wirklichen Verhalten der Luft, wenn man noch hinzufügt, daß auch das Vorwärtsgleiten infolge der Relativbewegung von Luft und Schraube nicht so zwangsläufig wie bei einem festen System erfolgt, sondern die Vorwärtsgeschwindigkeit um den sog. Schlupf geringer ausfällt.

Die Berechnung dieser Verhältnisse ist an dieser Stelle nicht erforderlich. Für uns ist nur wichtig, aus der obigen Betrachtung das Nachstehende zu folgern:

Die Drehgeschwindigkeit der Luft ist stets geringer als die Drehgeschwindigkeit der Luftschraube und hat denselben Drehsinn wie dieselbe.

Es ist anzunehmen, daß auch der angesaugte Luftstrom einen drehenden Impuls erhält, doch ist derselbe offenbar viel geringer und namentlich auch in Anbetracht dessen, daß die Geschwindigkeiten im angesaugten Luftstrom überhaupt sehr gering sind, kaum wahrnehmbar. Durch Versuche ist im Ansaugeluftstrom bisher noch keine erhebliche Drehbewegung nachgewiesen worden. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich daher nur auf Zugschrauben, d. h. auf solche, welche den Wind auf den Motor zuwerfen, wie dies praktisch meist der Fall ist.

Die Wirkung der drehenden Richtung des Luftstrahles besteht darin, daß der Luftstrahl den Motor in seinem Drehsinne mitzudrehen sucht. Diese Wirkung wollen wir den Seitenwiderstand des Motors nennen. Der Seitenwiderstand ist dabei wegen der etwas ungleichen Verteilung der Widerstandsfläche oberhalb und unterhalb der Schraubenachse kein reines Drehmoment, sondern ergibt noch eine seitliche Einzelkraft, welche wieder die Messung verfälschen würde, wenn eine solche Einzelkraft mit Bezug auf die Pendelrahmenachse ein Drehmoment ergibt (vgl. S. 13). Da nun, wie wir oben gesehen haben, die Richtung der Drehbewegung des Windstromes dieselbe ist, wie die Drehrichtung der Schraube, so sucht derselbe auch den Motor in der Richtung der Schraubendrehung mitzunehmen. Das der Messung zugrunde liegende Reaktionsmoment ist dagegen der Drehung der Schraube entgegengesetzt. Das Drehmoment des Seitenwiderstandes wirkt also dem zu messenden Reaktionsmoment entgegen oder anders ausgedrückt: das wirklich am Pendelrahmen gemessene Reaktionsmoment erscheint um das Moment des Seitenwiderstandes zu klein. Es sei darauf hingewiesen, daß Professor Baumann versehentlich erwähnt, daß »die zur Achse senkrechte Komponente des Schraubenwindes« das am Pendelrahmen gemessene Drehmoment zu groß erscheinen läßt (vgl. Motorwagen, März 1913).

Tabelle 2.

Motor	Nutzbares Drehmoment mkg	Seitenwiderstand	
		mkg	%
a	51,1	5,1	10,0
b	57,2	4,8	8,4
c	54,3	4,2	7,7
d_1	39,1	4,1	10,5
d_2	52,5	4,9	9,3
d_3	52,9	4,0	7,6
e	23,5	2,6	11,1
f_1	52,0	5,7	11,0
f_2	28,5	4,3	15,1
g_1	36,8	4,7	12,8
g_2	36,5	4,9	13,4
g_3	51,8	8,1	15,6
h_1	56,0	7,5	13,4
h_2	30,85	2,4	7,8
h_3	46,6	5,6	12,0
i	49,8	4,8	9,6

Über die Größe des Seitenwiderstandes gibt die Tabelle 2 für einige Spezialfälle Auskunft. Sie zeigt, daß derselbe so bedeutend ist, daß seine Bestimmung als Ergänzung der Hauptmessung am Pendelrahmen unbedingt erforderlich ist. Ein Bedenken gegen die Verwendung des Pendelrahmens überhaupt folgt jedoch daraus nicht, da der Bestimmung des Seitenwiderstandes durch eine Zusatzmessung mittels desselben Pendelrahmens keinerlei Schwierigkeiten im Wege stehen.

Bei der Verwendung von Windflügeln an Stelle der Luftschraube tritt jedoch kein wesentlicher Seitenwiderstand auf, was daraus hervorgeht, daß die Meßresultate mit den Resultaten, welche auf festem Versuchsstande bei elektrischer oder hydraulischer Bremsung gewonnen werden, gut übereinstimmen. So ergab sich im Laboratorium des Luftschiffbau Zeppelin bei den meisten Tourenzahlen volle Übereinstimmung zwischen Pendelrahmen und elektrischem Prüfstande. Die größte Differenz betrug nur 1,4% (vgl. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 1911). Die Prüfung mit Windflügeln bietet daher immer ein bequemes Mittel, das Drehmoment des Seitenwiderstandes auszuschalten. Will man also während des langdauernden Hauptversuches nicht auf die natürliche Kühlung verzichten, so kann man durch einen kürzeren Nebenversuch mit Windflügeln den Seitenwiderstand ausschalten und damit die Differenz zwischen beiden Versuchen ermitteln, welche gleich dem Drehmoment des Seitenwiderstandes ist. Dieses Verfahren dürfte bequemer und zuverlässiger sein, als die Bestimmung des Seitenwiderstandes durch einen unabhängig vom Motor erzeugten Schraubenstrahl. Diese letztere Methode ist ausführlich beschrieben in den Veröffentlichungen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt. Ihre Nachteile sind sowohl meßtheoretische als auch konstruktive.

Die meßtheoretischen Nachteile sind bereits S. 16 teilweise beschrieben worden. Die führenden Berliner Propellerfirmen schätzen den Unterschied zwischen den Leistungen bei Antrieb der Schraube durch Benzinmotor und Elektromotor auf bis zu 10%. Man wird des weiteren auch annehmen müssen, daß die Bewegungen des Motors selbst, insbesondere seine Erschütterungen, und der Ansauge- und Auspuffluftstrom einen gewissen Einfluß auf den Luftstrahl ausüben können. Es ist aber kaum möglich, den Flugmotor während des betrachteten Nebenversuches, bei dem er ja unbelastet ist, in derselben Weise in Gang zu halten, wie beim Hauptversuch.

Die konstruktiven Schwierigkeiten liegen darin, daß man die Schraube bei möglichst geringer Verschiebung auch auf der dem Motor entgegengesetzten Seite an eine Welle anschließen muß. Es darf dabei ihre Auswuchtung auch dann nicht leiden, wenn die Ummontage in kurzer Zeit bewirkt wird. Diese Schwierigkeit ist nicht unüberwindlich. Die Lösung besteht in der Anbringung einer sog. Anschlußnabe, die an jede Propellernabe befestigt werden kann und die die Verbindung zwischen dem Propeller und der anschließenden Welle vermittelt. Die Konstruktion des Verfassers ist seinerzeit den beteiligten Firmen vorgeschlagen und von allen angenommen worden. Wesentliche Schwierigkeiten hat sie im Betriebe nicht ergeben; die Ummontage erforderte höchstens ½ Stunde. Auch die übrigen konstruktiven Komplikationen, welche diese Anordnung mit sich bringt, wie z. B. die hohe Lagerung des Elektromotors, die Versperrung des Raumes vor der Luftschraube usw. führen zwar zu keinen Unmöglichkeiten, verteuern aber die gesamte Anlage ganz bedeutend. Die Ausführung des Nebenversuches mit Windflügeln ist daher bei weitem empfehlenswerter, wenn man sich nicht entschließt, den Hauptversuch selbst schon mit Windflügeln auszuführen.

Die vorstehenden Ausführungen über den Seitenwiderstand beziehen sich hauptsächlich auf feststehende Motoren. Bei den Rotationsmotoren liegen die Verhältnisse ganz besonders eigenartig. Bei diesen tritt der Seitenwiderstand hauptsächlich in Form des sog. Ventilationswiderstandes der Zylinder auf.. Derselbe ist ebenso abhängig von der Drehzahl, wie der Widerstand der Luftschraube oder der Windflügel und kann von diesem beim Betriebe überhaupt nicht getrennt werden. Mit Recht hat schon Professor Bendemann darauf hingewiesen, daß es ja denkbar wäre, daß ein Motor so innig mit der Luftschraube verwachsen sei, indem z. B. Organe des Motors im Fleisch der Schraube säßen, daß man überhaupt nicht angeben könne, welches Drehmoment der Widerstand der Schraube und welches der Widerstand des Motors wäre. Solche Konstruktionen sind allerdings nur ein Produkt der Phantasie. In Wirklichkeit kann bei jedem Rotationsmotor die Schraube sehr wohl vom Motor getrennt werden, und wenn man das nutzbare Drehmoment von feststehenden Motoren mit dem von Rotationsmotoren überhaupt vergleichen will, so wird man diese Trennung bei der Messung auch unbedingt durchführen müssen; denn das Drehmoment des Ventilationswiderstandes ist zweifellos kein nutzbares.

Es mag hier eingeschaltet werden, daß der Fehler, den man bei Vernachlässigung des Ventilationsdrehmomentes begehen würde, ein bedeutender ist. Beträgt doch der Ventilationswiderstand je nach Bauart der Motoren bis über 10% der gesamten Leistung.

Besonders schwierig wird die getrennte Bestimmung dieser beiden Drehmomente dadurch, daß jedes von ihnen zweifellos durch das gleichzeitige Vorhandensein des anderen beeinflußt wird. Wenn man z. B. den Rotationsmotor elektrisch belastet, so wird der Ventilationswiderstand ein anderer werden, als bei der Belastung durch eine Luftschraube. Auch hier ist die Belastung durch Windflügel günstiger. Bei ihr tritt diese Differenz nicht auf, da, wie wir schon oben bei den feststehenden Motoren gesehen haben, die von Windflügeln verursachte Luftbewegung keine wesentliche Fortsetzung nach dem Motor zu findet. Immerhin tritt bei Rotationsmotoren die Notwendigkeit eines weiteren Nebenversuches auf. Bei diesem weiteren Versuch ist das Drehmoment der Zylinder allein festzustellen, wobei jedoch die Luftschraube, von einem besonderen Antriebe betätigt, mitlaufen muß, um dieselben Strömungsverhältnisse wie beim Hauptversuch zu erzeugen. Man erhält dadurch das Zylinderdrehmoment allein und kann unter Abzug desselben im übrigen genau so verfahren wie bei feststehenden Motoren.

Es sind dann also folgende Versuche auszuführen:

1. Hauptversuch. Motor mit Luftschraube belastet. Gemessenes Drehmoment M_1.
2. Erster Nebenversuch. Motor und Luftschraube gesondert angetrieben. Gemessenes Motordrehmoment M_2.
3. Zweiter Nebenversuch. Motor mit Windflügeln belastet. Gemessenes Drehmoment M_3.

Die Versuche 2 und 3 können bei etwas vom Hauptversuche abweichenden Tourenzahlen vorgenommen und dann auf die Tourenzahl des Hauptversuches umgerechnet werden, da für diese reinen Rotationsbewegungen das quadratische Gesetz mit sehr großer Annäherung gilt.

Es berechnet sich dann der Seitenwiderstand zu $M_3 - M_1$ und das nutzbare Drehmoment zu $M_3 - M_2$. Verzichtet man auf die Kühlung durch den Schraubenwind, was bei Rotationsmotoren die natürliche Kühlung nicht wesentlich beeinträchtigt (die Geschwindigkeit des Schraubenwindes beträgt 15 bis 40 m/sec, die Rotationsgeschwindigkeit der Zylinder beträgt 50 bis 100 m/sec), so kann man den ersten Versuch fortlassen und den dritten Versuch als Hauptversuch durchführen. Man kommt dann mit einem einzigen Nebenversuch aus. Die Drehmomentsmessung an Rotationsmotoren und der Vergleich derselben mit feststehenden Motoren ist also mit dem Pendelrahmen einwandfrei durchzuführen, wenn nur die Forderung erfüllt wird:

Der Pendelrahmen muß zur Aufnahme einer Antriebsmaschine eingerichtet sein, welche gestattet, die Zylinder des Versuchsrotationsmotors anzutreiben, wobei die zugehörige Luftschraube von außen besonders betätigt wird.

Derartige Einrichtungen sind in der Deutschen Versuchsanstalt mit Erfolg ausgeführt worden.

Ähnliche Wirkungen wie auf den Motor selbst übt der Luftstrom auch auf die den Motor tragenden Stützen und ev. auch noch auf andere Teile des Pendelrahmens aus. Auch diese Wirkungen werden durch die oben beschriebenen Verfahren gleichzeitig für die Messung unschädlich gemacht, ja

sie treten gar nicht gesondert vom Seitenwiderstand des Motors in Erscheinung. Im übrigen ist ihr Betrag nicht sehr erheblich, wenn die bereits oben aus anderen Gründen statuierte Forderung erfüllt ist, daß der Pendelrahmen den freien Luftzug nicht behindert.

Eine weitere Fehlerquelle können Kräfte bilden, die durch das Bedienungsgestänge absichtlich, also in betrügerischer Weise, oder aber auch unabsichtlich auf den Motor übertragen werden. Die Bedienung des Flugmotors beschränkt sich meist auf Verstellung der Drosselklappe des Vergasers und der Zündung. Es wird sich stets durch einfache Mittel, etwa kleine Winkelhebel oder Baudenzüge, erreichen lassen, daß der zur Betätigung dieser Organe notwendige Zug in einer Richtung ausgeübt wird, welche keinen Hebelarm ergibt. Einzelkräfte durch die Motorachse werden aus der Messung aber schon durch die auf S. 13 formulierte Forderung ausgeschaltet. Eine besondere Eigenart des Pendelrahmens erfordern also die Bedienungskräfte nicht, sondern lediglich eine geeignete Vorschrift für die Montage des Bedienungsgestänges.

Weitere Kräfte werden beim Motorbetrieb durch die Zuleitungen der Betriebsstoffe erzeugt. Die Masse des zugeführten Benzins beträgt höchstens $^1/_{10}$ der verwendeten Luftmasse, die des Öles sogar höchstens $^1/_{50}$. Da dazu kommt, daß auch die Geschwindigkeiten in der Betriebsstoffzuleitung erheblich niedriger als die Geschwindigkeiten des Auspuffs sind, so ergibt sich, daß der Massenstoß vernachlässigt werden kann. Dasselbe gilt auch für die angesaugte Luft, deren Geschwindigkeit erheblich niedriger als die der ausgestoßenen ist, und deren Richtung zudem bei den meisten Bauarten in die Richtung der Motorachse fällt. Ähnlich ist es mit der Kühlwasserzu- und -ableitung bei Anwendung künstlicher Kühlung.

Ein 100 PS-Motor, der 300 WE/PS-Std. an das Kühlwasser abführt und dasselbe dabei um 5° erwärmt, gebraucht 100 l Wasser/Min. oder 1,67 l/sec. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/sec ergibt sich ein Druck von $\frac{1{,}67}{9{,}81}$ = 0,17 kg. An einem erheblichen Hebelarm angreifend, könnte dieser Druck einen Fehler von bis zu 1% hervorrufen. Liegen dagegen die Zu- und Ableitungen des Kühlwassers dicht beieinander (so daß die Mitten eine Entfernung von höchstens 100 mm haben), und sind die Strömungsgeschwindigkeiten annähernd dieselben, die Strömungsrichtungen entgegengesetzt, so beträgt der Fehler höchstens 0,02 mkg, was selbst bei einem verhältnismäßig schnell laufenden Flugmotor (Md = 40 mkg bei 100 PS) nur einen Fehler von 0,05% ausmacht, ein Fehler, der unbedenklich vernachlässigt werden darf.

Anders verhält es sich mit den statischen Drücken in den Betriebsstoffzuleitungen. Diese können einen erheblichen Betrag erlangen, der von der Höhe der freien Flüssigkeitsspiegel bzw. von dem Drucke abhängt, unter dem die Flüssigkeiten dem Motor zugeführt werden. Namentlich in der Wasserleitung, deren Querschnitt eine ganze Anzahl von qcm beträgt, kann der Druck auf mehrere kg steigen, wobei noch hinzukommt, daß die Drücke in der Zu- und Ableitung sich nicht aufheben sondern addieren. Es ist jedoch möglich, die Größe dieser statischen Drücke durch Messung der Flüssigkeitsspiegel und des Hebelarmes einwandfrei zu bestimmen und so für die Pendelrahmenmessung unschädlich zu machen, wenn man nicht wieder vorzieht, durch geeignete Richtung des Druckes den Hebelarm und damit auch das Drehmoment des Flüssigkeitsdruckes völlig zum Verschwinden zu bringen. Als sehr zweckmäßig erscheint es, die Enden der betreffenden Leitungen am Pendelrahmen ein- für allemal fest zu verlegen, weil man dann die Richtung der erörterten Kraftwirkungen stets genau kennt. Die Verbindung zwischen diesen festgelegten Enden und dem Motor kann jedem Motor besonders angepaßt werden. Diese übt keinerlei Einfluß auf die Messung aus. Die freien Enden dieser Leitungen dürfen natürlich nicht starr mit festverlegten Leitungen verbunden sein, da sonst die pendelnde Bewegung des ganzen Systems gesperrt wäre. Vielmehr ist die Verbindung durch Überlaufkästen oder durch elastische Rohre, Schläuche o. dgl. zu bewirken. Es sei erwähnt, daß Überläufe wegen ihrer freien Wasserspiegel für die Ölleitungen wegen der Gefahr der Verunreinigung, für die Wasserleitungen wegen der Beeinträchtigung der Messung durch Verdunsten, für die Benzinleitungen wegen beider Umstände und außerdem noch wegen der Feuersgefahr nicht zweckmäßig sind. Glaubt man sie für die Festlegung der statischen Druckhöhe nicht entbehren zu können, so soll man sie in einiger Entfernung vom Motor im festverlegten Teile der Leitung anbringen.

Die elastischen Verbindungen müssen so nachgiebig sein, daß sie bei der Auspendelung des Pendelrahmens aus seiner Mittellage keinen zu großen Rückdruck ergeben. Ein geringer Rückdruck ist nicht schädlich, sondern wirkt wie eine leichte Dämpfung; in der Mittellage müssen die Verbindungen natürlich völlig spannungsfrei sein. Durch genügend lange und weiche Schläuche lassen sich diese Bedingungen erfüllen.

Für die Benzin- und Ölleitungen kommen die obigen Rücksichten natürlich ganz in Wegfall, wenn Benzin- und Ölbehälter als zum Motor gehörig betrachtet und mit diesem auf den Pendelrahmen befestigt werden. Dasselbe gilt für die Wasserleitungen, wenn man auf jede künstliche Kühlung verzichtet. Die im nachfolgenden noch einmal zusammengefaßten Konstruktionsbedingungen gelten daher nur für den Eventualfall, daß überhaupt festverlegte Leistungen nach dem pendelnden System geführt werden müssen:

Der Pendelrahmen hat feste Rohranschlüsse für Benzin, Öl und Kühlwasser zu tragen.

Die beiden Anschlüsse für Kühlzu- und -abwasser sollen möglichst dicht beieinander liegen.

Die Richtungen aller Leitungen sollen mit Bezug auf die Motorachse keinen oder einen genau bekannten Hebelarm ergeben.

Die Verbindungen dieser Anschlußrohre mit den festverlegten Leitungen sollen elastisch und sehr nachgiebig sein.

Etwa notwendige Überläufe sind im festverlegten Teile der Leitung anzubringen.

3. Fehlerquellen des Pendelrahmens.

Nachdem wir im vorigen Abschnitte die Beeinflussung des Meßresultates durch verschiedene vom Betriebe des Motors abhängige Umstände und die sich aus ihr ergebenden Konstruktionsbedingungen kennen gelernt haben, gehen wir jetzt dazu über, die Fehler zu betrachten, die durch Mängel des Pendelrahmens selbst entstehen können.

Der Pendelrahmen ist, wie schon in der Einleitung bemerkt, eine Drehmomentswage und hat als solche alle Konstruktionsbedingungen einer Wage zu erfüllen. Dazu gehört in erster Reihe die Starrheit der Wagebalken. Die Konstruktionsteile, welche die zu messenden Kräfte aufnehmen und an das messende Organ fortleiten, dürfen unter der Einwirkung der größten Kräfte, für welche der Pendelrahmen entworfen wird, keine Deformation erleiden, welche die Genauigkeit der der Rechnung zugrunde gelegten Hebelarme beeinträchtigt. Es genügt also nicht, daß die Festigkeit groß genug ist, um einen Bruch zu verhüten, sondern auch erhebliche elastische Durchbiegungen müssen verhindert werden. Diese Forderung scheint der Forderung der elastischen Lagerung (vgl. S. 11) zu widersprechen. Die Lösung ergibt sich durch eine grundsätzliche Trennung der den Motor unmittelbar tragenden Holme, welche die erforderliche Elastizität besitzen müssen, und der übrigen Pendelrahmenkonstruktion, die eine erhebliche Starrheit haben muß. Für die Stützen und Fundamente gilt natürlich dasselbe wie für die Wagebalken. Mit Rücksicht auf die Tendenz in der Flugtechnik, immer stärkere Motoren und immer geringere Tourenzahlen anzuwenden, wird man eine größte Motorstärke von 300 PS und eine Tourenzahl von 800 pro Min. der Berechnung zugrunde legen. Diese Zahlen ergeben ein zu messendes Drehmoment von 260 mkg.

Die Stützen und Wagebalken des Pendelrahmens dürfen bei einer Beanspruchung durch ein Drehmoment von 260 mkg keine erhebliche elastische Formänderung erleiden.

Ist diese Forderung erfüllt, so wird auch die Motorleistung nicht durch Hin- und Herarbeiten des Pendelrahmens beeinflußt werden. Wegen der elastischen Hysteresis wird

auch bei vollkommen elastischen Formänderungen nicht der ganze Arbeitsbetrag, der zu elastischen Schwingungen aufgewendet wird, zurückgewonnen, sondern ein Motor, der Erschütterungen seines Fundaments verursacht, hat scheinbar eine kleinere Leistung. Sofern diese Schädigung der Nutzleistung durch die elastischen Holme verursacht wird, entspricht sie dem Verhalten im Flugzeuge, bildet also keinen Fehler des Verfahrens.

Zur Festigkeit des Pendelrahmens gehört es auch, daß alle Verbindungen so gut gesichert sind, daß eine Verlagerung von Konstruktionsteilen auch während eines vielstündigen Motorbetriebes nicht stattfinden kann. Andernfalls würde sich die anfangs vorgenommene Austarierung der Wage während des Versuches in unkontrollierbarer Weise verändern. Diese Bedingung ist ganz selbstverständlich. Es wird nur deshalb besonders auf sie hingewiesen, weil in dieser Beziehung Verstöße leicht vorkommen.

Fehler in der Tarierung können auch dadurch entstehen, daß im Motor selbst eine Änderung der Gewichtsverteilung eintritt. Fig. 9 zeigt beispielsweise einen Motor mit unsymmetrischem Ölbehälter. Nach Verbrauch eines Teiles des Öls ist der Schwerpunkt des Motors aus seiner früheren Lage seitlich fortgerückt. War die Wage mit dem Motor vorher austariert, so stimmt die Tarierung jetzt um das Drehmoment, das das verbrauchte Ölgewicht vorher ergab, nicht mehr. Solche Verlagerungen kommen bei den Flugmotoren in der Regel nicht vor. Sie sind aber immerhin möglich und können ev. absichtlich zum Zwecke der Täuschung vorgesehen werden. Diese Fehlerquelle wird einfach dadurch ausgeschaltet, daß man die Tarierung nach dem Versuche wiederholt. Durch diese Wiederholung erlangt man auch Gewißheit darüber, daß die obenerwähnten unzulässigen Verschiebungen am Pendelrahmen nicht stattgefunden haben.

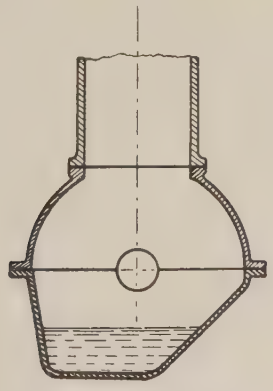

Fig. 9.

Sehr wichtig für die Brauchbarkeit einer Wage ist eine richtig bemessene Empfindlichkeit, sofern man unter derselben die Größe des Ausschlages der Meßvorrichtungen für eine bestimmte Belastungsänderung versteht. Die Empfindlichkeit kann durch geeignete Übersetzungen hydraulischer und mechanischer Art, welche in die Meßinstrumente eingeschaltet werden, erreicht werden. Anders steht es mit der Unempfindlichkeit, welche den Betrag angibt, unter dem ein Ausschlag überhaupt nicht erfolgt. Diese Unempfindlichkeit rührt in der Hauptsache von den beim Ausschlag auftretenden Reibungswiderständen her. Letztere sind beim Betriebe wegen der vom Flugmotor verursachten Erschütterungen erheblich geringer als im Ruhezustand, weshalb die Unempfindlichkeit im Ruhezustand kein Maß für die Brauchbarkeit des Pendelrahmens abgibt. Die äußerste Beschränkung der Reibungswiderstände erscheint daher bei dieser Art Wagen nicht so sehr notwendig wie bei anderen, weshalb man zugunsten einer absolut sicheren Führung der Gelenke eine gewisse Gelenkreibung in Kauf nehmen kann. Trotzdem hat es sich gezeigt, daß die Schneidenlagerung der Lagerung auf Kugelgelenken erheblich vorzuziehen ist. Allerdings muß die Anlage der Schneiden durch hohen Betriebsdruck auch bei starken Erschütterungen gesichert sein.

Der genauen Nachrechnung der Reibungswiderstände steht die Schwierigkeit im Wege, die Beeinflussung der Reibung durch die Erschütterungen des Betriebes richtig abzuschätzen. Wenn man, wie es z. B. auch in dem meisten Lehrbüchern heißt, sagt, daß die Reibungen durch Erschütterungen aufgehoben werden, so ist dieses in dieser allgemeinen Form zweifellos falsch. Vielmehr hängt es von der Stärke und der Frequenz der Erschütterungen, sowie von dem die Reibung erzeugenden Druck und dem Reibungskoeffizienten ab, um welchen Bruchteil der Reibungswiderstand vermindert wird. Man wird annehmen können, daß die Reibung den Ausschlag der Wage dann nicht mehr dauernd verhindert, wenn infolge eines mittelgroßen Betriebsstoßes zeitweilig der Druck zwischen den reibenden Flächen aufgehoben wird. Findet jedoch nur eine Verminderung dieses Druckes statt, beispielsweise von P_1 auf P_2, so bleibt eine Unempfindlichkeit übrig, die von der Unempfindlichkeit der Ruhe einen Teilbetrag, der dem Verhältnis $P_2 : P_1$ entspricht, ausmacht. Da die Kraft und Richtung der Stöße nach den Erörterungen im Abschnitt I. A. 2 bestimmt werden können, die ruhenden Drücke und Reibungskoeffizienten für die Ruhelage aber ebenso wie bei jeder anderen Maschinenkonstruktion für jeden Spezialfall mehr oder minder einfach zu ermitteln sind, so ist damit die Grundlage gegeben, auf der der Reibungswiderstand eines Pendelrahmens errechnet werden kann. Nach dem heutigen Stande der Technik ist eine Unempfindlichkeit von $\frac{1}{3}$% noch durchaus zulässig, und da Drehmomente von unter 15 mkg bei Flugmotoren nicht vorkommen, so darf die Unempfindlichkeit bei der geringsten vorkommenden Belastung noch 0,05 mkg betragen. Nimmt man an, daß das Verhältnis $P_2 : P_1$ für die Gelenke im Durchschnitt 1 : 10 beträgt, welcher Bruch nach den Erfahrungen der Praxis keineswegs zu klein gegriffen, aber natürlich von der betreffenden konstruktiven Anordnung abhängig ist, so ergibt sich für den Ruhezustand die Zulässigkeit einer Unempfindlichkeit von $\frac{1}{2}$ mkg oder ca. 3% der Belastung.

Diese Unempfindlichkeit ist jedoch dann zu groß, wenn auch der Ausschlag der Wage im betrieblosen Zustande einen Einfluß auf die Messung hat, d. h. wenn die Tarierung der Wage bei stillstehendem Motor stattfindet. Es könnten dann Nullpunktfehler bis zu 3% entstehen. Dieser Übelstand kann auf zwei Arten beseitigt werden: Entweder verlangt man, daß die Reibungswiderstände so gering sind, daß auch ohne die Erschütterungen eine genügende Empfindlichkeit vorhanden ist, oder man ruft zum Zwecke der Austarierung die Erschütterungen künstlich hervor. Die erste Forderung erscheint nicht angebracht mit Rücksicht darauf, daß der Betriebszustand eine robustere Ausbildung der Lager wünschenswert erscheinen läßt. Es entspricht vielmehr besser dem besonderen Wesen dieser Prüfungsmaschine, wenn man auch die Tarierung im Erschütterungszustande vornimmt. Dieser kann leicht durch eine geeignete Rüttelvorrichtung erzeugt werden. Der Vorteil, den man dadurch erlangt, daß man dann in der Ausbildung der Lager nicht ganz so ängstlich auf die Reibungswiderstände Rücksicht zu nehmen hat, ist so bedeutend, daß diese kleine Komplikation gerechtfertigt erscheint.

Man kann diese jedoch sogar entbehren, wenn die Prüfung des Motors auf mehreren, namentlich auch niedrigen Tourenzahlen stattfindet. Da der Luftwiderstand sowohl von Windflügeln als auch von Luftschrauben mit sehr guter Annäherung einer Potenz der Tourenzahl proportional ist, deren Wert sehr dicht an 2 liegt, ergibt die Auftragung der Drehmomente als Funktionen der Quadrate der Tourenzahl (vgl. Fig. 10), eine fast gerade Linie, deren Durchgang durch die Ordinatenachse den Nullpunkt und die Lage der Abszissenachse bestimmt. Diese Linie ist annähernd schon durch 2, genau genug jedenfalls durch wenige Messungen bestimmbar. Eine besondere Komplikation des Prüfungsverfahrens liegt in diesem Vorgehen nicht, weil die Prüfung bei gedrosseltem Motor ohnehin meist zum Programm gehört.

Zusammenfassend verlangen wir also bezüglich der Tarierung und Unempfindlichkeit:

Alle Verbindungen des Pendelrahmens müssen so fest sein, daß Verlagerungen während des Betriebes ausgeschlossen sind.

Die Unempfindlichkeit im Betriebszustande soll $\frac{1}{3}$% nicht übersteigen.

Falls die Prüfung nicht bei verschiedenen Tourenzahlen stattfinden soll, ist eine geeignete Rüttelvorrichtung anzubringen.

Von der Unempfindlichkeit, welche einen Ausschlag überhaupt verhindert, ist die Dämpfung zu unterscheiden, die den Ausschlag nur zeitlich verzögert. Ein überempfindlicher Pendelrahmen, welcher jede kleinste Schwankung des Drehmoments auch schon während der Dauer einer Umdrehung auf die Meßinstrumente übertragen würde, wäre unzweckmäßig. Eine genaue Ablesung wäre weder durch eine Zeigervorrichtung möglich, weil das Auge der Zeigerbewegung nicht schnell genug folgen könnte, noch durch eine registrierende Vorrichtung, weil die Schreibfeder eine breite Zone bestreichen würde. Die Erschütterungen würden auch die Meßgeräte schnell ruinieren. Es ist deshalb notwendig, die Anzeige der Belastungsänderung so zu verzögern, daß nur dauernde Änderungen des mittleren Drehmomentes angezeigt werden.

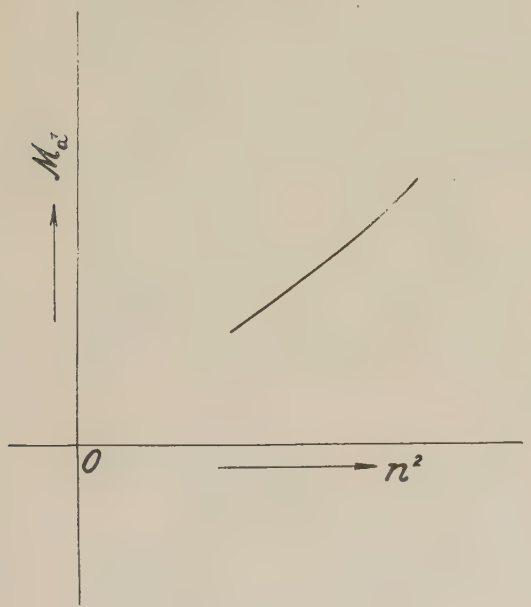

Fig. 10.

Eine gewisse Dämpfung liegt bereits in dem Reibungswiderstande des Systems. Aber diese Art der Dämpfung beeinträchtigt gleichzeitig die Empfindlichkeit. Dagegen ist die Dämpfung durch die Trägheit nur nützlich und sollte daher möglichst groß sein. Reichen diese Momente noch nicht aus, so werden besondere Dämpfungsorgane vorzusehen sein. Solche Dämpfungen sollen bei plötzlich auftretenden Beanspruchungen eine starke Gegenkraft geben; für den Fall, daß diese Beanspruchungen jedoch fortdauern, muß diese Gegenkraft verschwinden. Das übliche Mittel, eine solche Dämpfung hervorzubringen, ist ein Flüssigkeitskatarakt. Die geeignete Dimensionierung desselben ergibt sich aus der Größe der zu erwartenden plötzlichen Druckschwankungen und aus der Zeit, um die man die Anzeige verzögern will. Für den vorliegenden Zweck erscheint eine Verzögerung um ca. 1 Sek. für die Belastungsschwankungen von 3% angebracht.

Es muß jedoch ganz besonders nachdrücklich darauf hingewiesen werden, daß diese Öldämpfung auf keinen Fall die S. 11 geforderte Elastizität der Motorlagerung behindern darf. Würde man die Schwankungen des Motors von einer solchen Dämpfungsvorrichtung aufnehmen lassen, so käme dieses einer starren Lagerung nahe, da ja die Dämpfung im ersten Augenblick der Bewegung einen sehr großen Widerstand entgegenbringt. Die Dämpfung soll daher nur die massive Rahmenkonstruktion beeinflussen.

Ferner ist darauf zu achten, daß zwischen der Dämpfung und den zu dämpfenden beweglichen Konstruktionsteilen keine Verbindungsglieder von erheblicher Elastizität eingeschaltet sein dürfen. Andernfalls würde die Formänderung dieser Verbindungsglieder die Beweglichkeit auch bei starker Dämpfung freigeben und die Wirkung derselben wäre vereitelt.

Bei Verwendung besonders empfindlicher Meßinstrumente wird es sich empfehlen, diese selbst außerdem in geeigneter Weise zu dämpfen; diese Vorsicht wird in der Regel schon an den Instrumenten berücksichtigt sein.

Bezüglich der Dämpfung gilt also:

Das Trägheitsmoment des pendelnden Systems mit Bezug auf die Pendelachse soll möglichst groß sein.

Die steifen, nicht etwa auch die elastischen, beweglichen Konstruktionsteile des Pendelrahmens sind durch starre Verbindungen an eine wirksame Flüssigkeitsdämpfung anzuschließen.

Zur Kontrolle der aus den Hebellängen errechneten Übersetzung ist ebenso wie bei jeder anderen Wage eine Eichung bei verschiedenen Belastungen wünschenswert. Da das zu messende Objekt nicht eine Kraft, sondern ein Kräftepaar ist, so darf die Belastung bei der Eichung nur dann durch einfache seitliche Gewichte erfolgen, wenn eine einseitige Belastung nach Maßgabe der speziellen konstruktiven Anordnung des pendelnden Systems keine Verschiebung des Übersetzungsverhältnisses zur Folge haben kann. Besser ist es, in jedem Falle die Belastung durch ein Kräftepaar vorzunehmen. Die Anbringung eines solchen, etwa in Form von über Rollen geführten Gewichten nach Fig. 11, erscheint in jedem Falle leicht anwendbar. Man kann jedoch auch die Eichung durch einen dem wirklichen Betriebe ähnlich kommenden Betrieb mittels Windflügeln, deren Widerstand genau bekannt ist, vornehmen. Besondere Vorkehrungen sind daher zur Eichung des Pendelrahmens nicht erforderlich. Bei einigermaßen sorgfältiger Ausführung und genügender Starrheit der Konstruktion, die bereits S. 19 gefordert wurde, wird übrigens die Eichung innerhalb der beabsichtigten Belastungen keine bemerkenswerte Abweichung von dem errechneten Übersetzungsverhältnis ergeben.

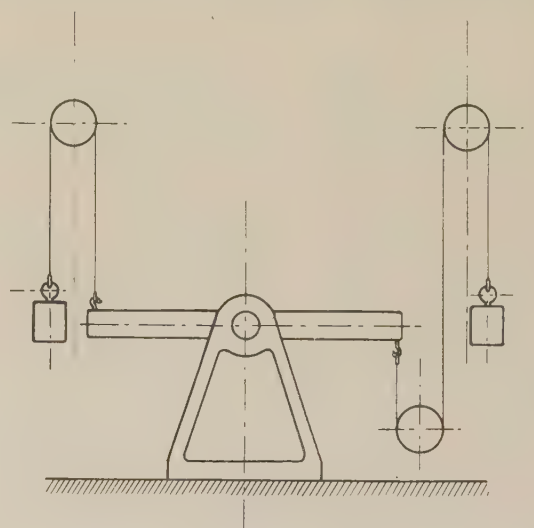

Fig. 11.

β) Die Nebenmessungen.

Zwecks Bestimmung der Leistungen ist als Ergänzung zur Drehmomentsmessung die Tourenmessung notwendig.

Der Antrieb eines Tachometers vom Motor selbst kann nur dann bewirkt werden, wenn man das Techometer in nicht zu weiter Entfernung vom Motor aufstellt und sich mit einfacher Ablesung begnügt. Registrierende Tachometer oder solche, welche an einem entfernteren Beobachtungsposten aufgestellt werden sollen, können mit den schwachen, am Motor zur Verfügung stehenden Antriebsorganen (gewöhnlich kommt ein freies Ende der Steuerwelle in Frage) nicht betriebssicher betätigt werden. Da jedoch die Ablesung in unmittelbarer Nähe des Motors aus verschiedenen betriebstechnischen Gründen nicht wünschenswert ist, auch häufig für die Versuchsprotokolle selbsttätig registrierte Drehzahlkurven verlangt werden, so ist entschieden dazu zu raten, Tourenmessungen zu

wählen, die keinen unmittelbaren Antrieb vom Motor verlangen. Dieses Problem läßt sich auf verschiedenen Wegen befriedigend lösen und zwar kommen dabei in Betracht:

1. Stroboskopische Beobachtung des Motors,
2. elektrische Kontaktvorrichtungen,
3. Vibrationskämme.

Jede dieser drei Methoden hat ihre Vorzüge und Nachteile, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden kann. Wichtig ist hier nur, festzustellen, daß die Tourenmessung auf diesem Wege bewirkt werden kann, ohne daß eine feste Verbindung des Motors mit dem Tourenzähler besteht. Dann braucht nämlich der Pendelrahmen keine besondere Einrichtung zur rückdruckfreien und betriebssicheren Übermittlung der Tourenanzeige zu besitzen. Die sich hieraus ergebende Bedingung hat daher einen mehr negativen als positiven Charakter:

Der Pendelrahmen braucht keine besondere Einrichtung zur rückdruckfreien und betriebssicheren Vermittlung der Tourenanzeige zu besitzen, wenn der Antrieb des Tachometers nicht vom Motor abgeleitet wird.

Neben der Bestimmung der Leistung, die die Aufgabe des Pendelrahmens ist, sind bei der Prüfung der Motoren gleichzeitig eine Reihe anderer Messungen auszuführen, die an dieser Stelle jedoch nur soweit Erwähnung verdienen, als durch sie die Konstruktion des Pendelrahmens beeinflußt wird.

Hierzu gehört vor allem die Messung des Axialschubes, welcher bei Verwendung von Luftschrauben auftritt. Derselbe ist für ein bestimmtes Drehmoment und eine bestimmte Tourenzahl durch den verwendeten Propeller bestimmt. Er gibt ein Maß für die Beurteilung des Motors insofern, als er durch den Stirnwiderstand, welchen der Motor dem Winde entgegensetzt, verkleinert wird. Wir haben es hierbei mit der zweiten Wirkung des Windes auf den Motor zu tun; die erste hat als Seitenwiderstand S. 17ff. ihre Erörterung gefunden.

Der Stirnwiderstand ist vom Schraubenzuge abzuziehen, wenn man den nutzbaren Vortrieb erhalten will. Er kann daher die Nutzleistung ebenso beeinflussen, wie die im Wirkungsgrad zum Ausdruck kommenden Verlustquellen des Motors. Es ist deshalb u. a. von Geheimrat Riedler mit Recht hervorgehoben worden, daß eine Wertung des Motors ohne Berücksichtigung seines Stirnwiderstandes nicht stattfinden kann. Der Stirnwiderstand ist durch die intensive natürliche Kühlung bedingt, soll aber die durch diese erforderliche Größe möglichst nicht überschreiten. Durch konstruktive Mittel kann der Fabrikant diese Verlustgröße mehr oder weniger geschickt beeinflussen, und für den Prüfstand ergibt sich die Notwendigkeit, das Resultat dieser konstruktiven Maßregeln zu messen. Hierzu genügt es, wenn ein kräftiger Luftstrom etwa von einer elektrisch angetriebenen Luftschraube gegen den Motor gerichtet wird und der Pendelrahmen eine geeignete Einrichtung zum Messen des auf den Motor ausgeübten Axialschubes besitzt.

Bei dieser Gelegenheit mag hervorgehoben werden, daß es wünschenswert ist, den Axialschub auch in der entgegengesetzten Richtung messen zu können, namentlich für den Fall, daß der Motor selbst eine Luftschraube antreibt. Diese zusätzliche Meßvorrichtung gestattet dann neben dem Drehmoment des Motors auch den Schraubenzug (bzw. den Stirnwiderstand) anzugeben, eine Angabe, welche zwar die engere Aufgabe des Pendelrahmens, nämlich die Drehmomentsmessung überschreitet, in den meisten Fällen aber sehr erwünscht sein wird. Es ist also zu fordern:

Der Pendelrahmen muß mit einer Vorrichtung zum Messen des auf den Motor ausgeübten Axialschubes nach beiden Richtungen hin ausgerüstet sein.

Nächst der Leistung muß für Flugmotoren das Gewicht genau bestimmt werden, da erst durch das Verhältnis beider ein Maßstab für die Überlegenheit einer Konstruktion gewonnen wird Es sind nun folgende drei Möglichkeiten vorhanden: Entweder wird das Gewicht vor der Montage auf dem Pendelrahmen bestimmt oder nach der Montage auf dem Pendelrahmen selbst oder nach erfolgter Abmontage.

Der erste Weg hat folgende Nachteile: Bei der Montage stellt sich vielfach noch die Notwendigkeit der Anbringung des einen oder anderen Zubehörteiles heraus, während andere ev. wieder in Fortfall kommen können. Auch die den Motor unmittelbar tragenden Holme usw., deren Gewicht man häufig mitbewerten will, werden erst bei der Montage richtig zugeschnitten. Ferner besteht die Möglichkeit, daß bei der Wägung im unmontierten Zustande Teile vergessen oder absichtlich entfernt werden, welche im montierten Zustande unmittelbar vor Beginn des Prüfungsbetriebes unbedingt angebracht sein müssen.

Die Wägung nach Abschluß der Versuche trifft auf ähnliche Bedenken. Auch bei dieser können Teile vergessen oder unterschlagen werden. Ganz besonders aber ist die exakte Bestimmung des Gewichtes in Frage gestellt, wenn während der Versuche Störungen, Brüche oder Brände vorgekommen sind. Es erscheint daher durchaus notwendig, die Wägung im betriebsfertigen Zustande vor Beginn des Hauptversuches auf dem Pendelrahmen selbst vorzunehmen. Daher ergibt sich für diesen folgende Konstruktionsbedingung:

Der Pendelrahmen muß die Bestimmung des Gewichtes des auf ihm montierten Motors gestatten.

Bezüglich der Messung des Betriebsstoffverbrauches ist zu bemerken, daß diese in der Gewichtsbestimmung enthalten ist, wenn die Betriebsstoffe sich in festen Behältern des pendelnden Systems befinden. Werden sie dagegen von außen diesem zugeführt, so können die Meßvorrichtungen in den festverlegten Teilen der Leitungen angebracht werden. Besondere Schwierigkeiten für die Pendelrahmenkonstruktion entstehen hieraus nicht. Ebensowenig aus allen übrigen Messungen, welche etwa sonst noch erwünscht erscheinen, wie die Bestimmung von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftdruck usw.

C. Allgemeine Gesichtspunkte.

1. Betriebssicherheit.

Zur Betriebsfähigkeit gehört neben der Erfüllung des speziellen Maschinenzweckes, welche in den vorigen Abschnitten ausführlich behandelt wurde, noch die Betriebssicherheit. Diese spielt bei der vorliegenden Aufgabe noch eine ganz besonders beachtenswerte Rolle und zwar aus zwei Gründen:

Erstens ist der Flugmotor selbst eine verhältnismäßig betriebsunsichere Maschine. Namentlich bei Probebetrieben muß mit Zerreißen der Propeller, mit Zylinderbrüchen usw. gerechnet werden. Das Bedienungspersonal ist also vor etwa vom Motor abfliegenden Teilen zu schützen.

Der Bedienungsstand soll in einiger Entfernung vom Motor außerhalb der Bewegungsebene der Luftschraube oder Windflügel hinter einer geeigneten Schutzwand liegen.

Daraus ergibt sich selbstverständlich, daß Handgriffe oder abzulesende Instrumente sich nicht in unmittelbarer Nähe des Motors befinden dürfen.

Ferner entsteht eine Gefahr dadurch, daß durch den langdauernden, erschütterungsreichen Betrieb die Verbände des Pendelrahmens gelockert werden. Es sind deshalb nur durchaus unlösbare Verbindungen anzuwenden. Schraubensicherungen durch Gegenmuttern oder federnde Unterlagsscheiben sind ungenügend:

Sämtliche Schrauben des Pendelrahmens müssen durch Splinte gesichert sein.

Des weiteren ist es sehr gefährlich, den Motor in der beim Flugzeug üblichen Weise durch Herumwerfen der Schraubenflügel von Hand anzuwerfen. Bei der hohen Lage des Motors ist hierzu ein Podium erforderlich, auf dem der Monteur niemals so sicher steht wie auf dem gewachsenen Boden des Flugfeldes. Trotzdem er auf letzterem in seinen Bewegungen völlig unbeengt ist, was auf dem Prüfstand meist nicht der Fall sein wird, sind auch dort Unglücksfälle, auch solche mit tödlichem Ausgange, nicht selten, und ist es daher schon beim Flugzeug wünschenswert, das Anwerfen mechanisch auszuführen, so ist dieses für den Prüfstand eine dringende Notwendigkeit. Eine Schwierigkeit besteht in dieser Hinsicht

nicht, wenn man den Motor mit einem besonderen Anwerfmagneten ausstattet. Diese Methode des Anwerfens hat sich bereits bestens bewährt.

2. Wirtschaftlichkeit.

Die Herstellungskosten eines Pendelrahmens sind naturgemäß um so höher, je weitergehend die Forderungen sind, die man an seine Vollkommenheit stellt. Doch bin ich der Meinung, daß in einzelnen Fällen übertrieben komplizierte und teure Anlagen erbaut worden sind, die nicht mehr leisten, als erheblich billigere anderer Konstruktion geleistet hätten. Es ist daher bei jeder Komplikation zu erwägen, ob der durch sie erreichte Vorteil in vernünftigem Verhältnis zu den aufgewendeten Mehrkosten steht. Im Betriebe stellt sich der Pendelrahmen gegenüber allen anderen Bremsvorrichtungen viel wirtschaftlicher, weil er bedeutend weniger Bedienungsmannschaft erfordert. Aus diesem Grunde beginnt er auch bei der Industrie beliebt zu werden.

Im ganzen sind drei verschiedene Verwendungsarten für ihn denkbar:

1. In der Prüfstation industrieller Firmen zum Zwecke der Kontrolle des fehlerfreien Baues, der richtigen Einregulierung und des Einlaufens in der Fabrik des Fabrikanten oder zum Zwecke der Kontrolle durch den Abnehmer;
2. in wissenschaftlichen Forschungsinstituten zur Ermittelung des Einflusses der verschiedensten Umstände auf das Verhalten der Motoren;
3. bei Gelegenheit von ausgeschriebenen Wettbewerben, zum Vergleich verschiedener Motoren in der für den Wettbewerb bestimmten Versuchsanstalt.

Man könnte daran denken, für jede dieser drei Aufgaben eine besondere Konstruktion zu entwerfen, und in der Tat sind auch die Bedürfnisse der drei Verwendungszwecke in einzelnen Punkten verschieden. So ist z. B. eine Firma, die lediglich ihre wenigen Motortypen auf dem Pendelrahmen einregulieren will, nicht genötigt, denselben auch für ganz außerordentlich angeordnete Bauarten einzurichten, wie dieses bei einer Versuchsanstalt für Wettbewerbe notwendig ist. Letztere wiederum wird auf Feinheiten der Messung verzichten können, welche nach den jeweilig geltenden Wettbewerbsbestimmungen keinen Einfluß auf die Preisverteilung haben, aber für exakte wissenschaftliche Forschungen unbedingt notwendig wären.

Es spricht jedoch eine ganze Reihe von Gründen dafür, den Pendelrahmen so zu konstruieren, daß er allen drei gedachten Zwecken genügt. Für die Prüfstände der Industrie ergibt sich der Vorteil, daß dieselben gleich zur Vorbereitung der für Konkurrenzen bestimmten Motoren benutzt werden können, wenn die Prüfstände nach denselben Prinzipien gebaut sind, wie die der Versuchsanstalt. Auch von den Resultaten der Forschungsinstitute wird die Industrie besser Nutzen ziehen können, wenn ihre eigenen Prüfstände den Vergleich mit denen dieser Institute zulassen. Die Vergleichsmöglichkeit mit den ungleich zahlreicheren Messungen der praktischen Industrie ist aber auch anderseits ein wesentlicher Vorteil für die Forschungsinstitute. Die Versuchsanstalten für Wettbewerbe ihrerseits werden in der Regel selten Selbstzweck sein, sondern sollen gleichzeitig wissenschaftlichen Zielen zustreben.

In jedem Falle aber hat die gemeinsame Konstruktion den Vorzug erhöhter Absatzmöglichkeit, wodurch ein geringerer Preis bei guter Ausführung ermöglicht wird.

Die universale Verwendbarkeit für alle Arten von Flugmotoren bedingt keine allzu großen Komplikationen. Etwas anderes ist es, wenn auch kleine Automobilmotoren oder Luftschiffsmotoren auf denselben Stand geprüft werden sollen. Es ist dieses bei der vorliegenden Arbeit nicht vorausgesetzt. Wenn die zu messenden Drehmomente in sehr weiten Grenzen variieren, kann sich die Notwendigkeit der Verwendung von mehreren Pendelrahmen verschiedener Größen ergeben; für das Bereich von 100 bis 300 PS, in dem die heutigen Flugmotoren sich bewegen, reicht jedoch derselbe Stand jedenfalls aus.

Die wesentlichen Punkte der Bauart, welche die universale Verwendbarkeit erschweren, sind folgende:

1. Drehrichtung der Schraube. Die weitaus größte Anzahl der Flugmotoren ist für rechtsläufige Schrauben eingerichtet. (Bei dieser Gelegenheit sei die wenig bekannte Tatsache bemerkt, daß eine Luftschraube in demselben Falle rechtsläufig ist, wenn eine Maschinenschraube rechtsläufig ist, d. h. wenn sie im Sinne des Uhrzeigers gedreht, sich von dem Beobachter fortschraubt.) Immerhin kommen auch linksläufige Schrauben vor.
2. Zylinderanordnung, rotierend oder fest, in letzterem Falle stehend oder hängend. Die Verwendbarkeit derselben Prüfungseinrichtung für diese beiden Gattungen ist ganz besonders wichtig, um die Meinungen über die Vorzüge derselben endlich zu klären.
3. Anordnung der Schraube als Druck- oder Zugschrauben, ferner bei Rotationsmotoren vor oder hinter den Zylindern. Es ist sehr wenig erwünscht, wenn man beispielsweise bei Wettbewerben in dieser Beziehung besondere Vorschriften machen muß, weil dadurch Motorbauarten, welche auf eine andere Anordnung eingerichtet sind, ungerechterweise erheblichen Schaden erleiden müssen.

Es ist also zu verlangen:

Der Pendelrahmen soll zur Prüfung der verschiedensten Motorbauarten eingerichtet sein und die Drehmomentsmessung für jeden der beiden Drehsinne zulassen.

II. Bauarten.

Bevor die verschiedenen Bauarten einer Kritik unterzogen werden, soll im folgenden eine übersichtliche Zusammenstellung der im Abschnitt I aufgestellten Bedingungen gegeben werden. Die einzelnen Forderungen werden dabei numeriert, um sie während der späteren Erörterungen kurz zitieren zu können.

A. Der Prüfstand soll ortsfest sein und muß die Prüfung des Motors unter denselben Betriebsumständen gestatten, wie sie im freien Fluge herrschen.

1. Der den Motor tragende Rahmen darf nicht so starr sein, daß er die Vibration des Motors völlig verhindert. Vielmehr müssen die bei Bewegungen des Motors um wenige Millimeter auftretenden elastischen Gegenkräfte noch erheblich kleiner sein als das Gewicht des Motors.
2. Der Pendelrahmen muß für Luftschraube oder Windflügel einen ausreichenden Spielraum lassen; die Höhe der Motorachse über Fußboden muß mindestens 1,85 m betragen.
3. Der Pendelrahmen darf den Luftzug in Richtung der Motorachse nicht wesentlich behindern.
4. Der Pendelrahmen muß die Schrägstellung der Motoren nach allen Richtungen um diejenigen Winkel zulassen, welche im praktischen Flugbetriebe vorkommen.
5. Der Pendelrahmen soll tunlichst die Einschließung des Motors und der zugehörigen Windflügel in einer luftdichten Kammer gestatten, in welche jedoch nur die den Motor unmittelbar tragenden Teile des Pendelrahmens hineinragen.

B. Bedingungen mit Bezug auf die Messungen.

6. Der Pendelrahmen muß die Ablesung des erzeugten Drehmoments ungestört durch etwa auf die Drehachse wirkende Einzelkräfte gestatten.
7. Der Pendelrahmen soll die Messung des Drehmoments so gestatten, daß eine Veränderung des Hebelarmes der Auspuffrichtung mit Bezug auf die Pendelachse möglich ist.
8. Der Pendelrahmen muß zur Aufnahme einer Antriebsmaschine eingerichtet sein, welche gestattet, die Zylinder des Versuchsrotationsmotors allein anzutreiben, wobei die zugehörige Luftschraube von außen besonders betätigt wird.
9. Der Pendelrahmen hat feste Rohranschlüsse für Benzin, Öl und Kühlwasser zu tragen.

   Die beiden Anschlüsse für Kühlzu- und -abwasser sollen möglichst dicht beieinander liegen.
10. Die Richtungen aller Leitungen sollen mit Bezug auf die Motorachse keinen oder einen genau bekannten Hebelarm ergeben.

    Die Verbindung dieser Anschlußrohre mit den festverlegten Leitungen sollen elastisch und sehr nachgiebig sein.

    Etwa notwendige Überläufe sind im festverlegten Teile der Leitung anzubringen.
11. Die Stützen und Wagebalken des Pendelrahmens dürfen bei einer Beanspruchung durch ein Drehmoment von 130 mkg keine erhebliche elastische Formänderung erleiden.
12. Alle Verbindungen des Pendelrahmens müssen so fest sein, daß Verlagerungen während des Betriebes ausgeschlossen sind.
13. Die Unempfindlichkeit im Betriebszustande soll $^1/_3\,\%$ nicht übersteigen.
14. Falls die Prüfung nicht bei verschiedenen Tourenzahlen stattfinden soll, ist eine geeignete Rüttelvorrichtung anzubringen.
15. Das Trägheitsmoment des pendelnden Systems mit Bezug auf die Pendelachse soll möglichst groß sein.
16. Die steifen, nicht etwa auch die elastischen, beweglichen Konstruktionsteile des Pendelrahmens sind durch starre Verbindungen an eine wirksame Flüssigkeitsdämpfung anzuschließen.
17. Der Pendelrahmen braucht keine besondere Einrichtung zur rückdruckfreien und betriebssicheren Vermittlung der Tourenanzeige zu besitzen, wenn der Antrieb des Tachometers nicht vom Motor abgeleitet wird.
18. Der Pendelrahmen muß mit einer Vorrichtung zum Messen des auf den Motor ausgeübten Axialschubes nach beiden Richtungen hin ausgerüstet sein.
19. Der Pendelrahmen muß die Bestimmung des Gewichtes des auf ihm montierten Motors gestatten.

C. Bedingungen nach allgemeinen Gesichtspunkten.

20. Der Bedienungsstand soll in einiger Entfernung vom Motor außerhalb der Bewegungsebene der Luftschraube oder Windflügel hinter einer geeigneten Schutzwand liegen.
21. Sämtliche Schrauben des Pendelrahmens müssen durch Splinte gesichert sein.
22. Der Pendelrahmen soll zur Prüfung der verschiedensten Motorbauarten eingerichtet sein und die Drehmomentsmessung für jeden der beiden Drehsinne zulassen.

A. Pendelrahmen mit axialer Lagerung.

Die Messung des Drehmoments von Kraftmaschinen mittels pendelnder Aufstellung hat historisch ihren Ausgang genommen von den Dynamomaschinen mit pendelndem Pohlgehäuse. Diese stellten insofern einen erheblichen Fortschritt dar, als sie die direkte Bestimmung unter Ausschaltung der durch die elektrischen Wirkungsgrade bedingten Meßfehler gestatteten. Über die Entwicklung der Leistungsmessung mittels Pendeldynamos findet man näheres in dem Aufsatze von Langer und Finzi, Z. d. V. D. I. 1914, Nr. 2. Solche Dynamomaschinen haben auch zur Prüfung von Flugmotoren eine gewisse Verbreitung gefunden, und da sie gewissermaßen Vorläufer der Pendelrahmen darstellen, sei hierüber folgendes Nähere mitgeteilt:

Die bereits erwähnte Royal Aircraft Factory besitzt eine Dynamomaschine zur Bremsung von Flugmotoren, deren Pohlgehäuse auf zwei Zylindersegmenten ruht, welche in Schneiden gelagert sind. Der Automobilclub of America hat 1910 eine große Prüfanlage für Verbrennungsmotoren geschaffen, die im »Horseless age« als »the most up to date power measuring machine in the world« gefeiert wird. In Deutschland und Frankreich werden ähnliche Maschinen vielfach benutzt, so z. B. von der Firma Lanz und der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt. Die Bremsdynamo der letzteren hat besonders große Abmessungen und ist eine Spezialkonstruktion der Firma Dr. Max Levy in Berlin.

An diese Maschinenart lehnen sich die Pendelrahmen mit axialer Lagerung mehr oder weniger an, insbesondere tun dies diejenigen, welche weiter unten in der ersten Gruppe behandelt werden. Alle Pendelrahmen mit axialer Lagerung haben den Vorteil, daß sie die Forderung 6 vollkommen erfüllen und

dieser Vorteil ist so in die Augen springend, daß man sich zunächst versucht fühlt, die axiale Lagerung für die einzig richtige zu halten. Bedenkt man aber, daß damit noch lange nicht alle Bedingungen der korrekten Messung erfüllt sind, ferner, daß die Nachahmung des wirklichen Betriebszustandes durch diese Anordnung sehr erschwert wird, so wird man gern auf die axiale Lagerung verzichten, wenn es auch auf andere Weise möglich ist, die Bedingung 6 zu erfüllen. Daß dieses der Fall ist, werden wir weiter unten sehen.

Die Ausführungsformen dieser Gruppe können wir in drei Untergruppen einteilen. Bei der ersten findet die Pendelung um zwei Lager statt, bei der zweiten nur um ein Lager, bei der dritten Gruppe sind wirkliche Lager in der Motorachse überhaupt nicht vorhanden. Es wird vielmehr durch geeignete kinematische Elemente das pendelnde System so geführt, als wenn es in der Motorachse gelagert wäre.

1. Lager vor und hinter dem Motor.

Die Anordnung, bei der sich sowohl vor als auch hinter dem Motor ein Lager des Pendelrahmens befindet, ist die naheliegendste und auch die mit den geringsten Mitteln zu verwirklichende. Sie war daher bis vor kurzem die einzige, welche in einer größeren Anzahl von Ausführungen Eingang in die Praxis gefunden hat. Während das hintere Lager ein gewöhnliches Zapfenlager sein kann, muß der Zapfen des vorderen Lagers hohl sein, um der Kurbelwelle des Motors den Durchtritt zu gestatten.

Eines solchen Pendelrahmens bediente sich bereits vor mehreren Jahren der Luftschiffbau »Zeppelin« in Friedrichshafen zur Prüfung der Maybach-Motoren (vgl. Zeitschrift für »Flugtechnik und Motorluftschiffahrt« 1911, Heft 21).

Desgleichen benutzte die Firma Benz in Mannheim dieses System. Die Konstruktion, deren Urheber die Ingenieure Berger und Lehmbeck waren, ist in Fig. 12 dargestellt.

Fig. 13 und 14 zeigen photographische Aufnahmen des Prüfstandes mit einem darauf montierten Motor.

Auch die N.A.G. hatte neben festen Prüfständen einen solchen Pendelrahmen in ihrem auf dem Flugplatz Johannisthal belegenen Versuchsständen in Betrieb (vgl. die Figur in »Technik und Wirtschaft«, Jahrg. 1913, Heft 7). Derselbe war von den Chronoswerken geliefert und später an Ort und Stelle umgebaut worden. Ähnliche, mehr oder minder primitive Einrichtungen finden sich noch mehrfach in der Industrie.

In der Kgl. Sächs. Mechanisch-technischen Versuchsanstalt hat Professor Scheit neben einem einfachen, den oben beschriebenen Einrichtungen ähnlichen Bremsstande, eine Prüfungseinrichtung erprobt, welche gestattet, den Motor zusammen mit dem Flugzeuge zu untersuchen. (Vgl. Deutsche Luftfahrer-Zeitschrift, Bd. XVI, Heft 8 und Allgemeine Automobil-Zeitung 1912, Nr. 18.)

Neuerdings hat Professor Scheit eine Abart des einfachen Pendelrahmens entwickelt, welche zum direkten Einbau in das Flugzeug bestimmt ist. (Vgl. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 1914, Heft 6.)

Die Konstruktion von Scheit ist die einzige dieser Gruppe, welche den Versuch macht, die Forderung der Nachahmung des wirklichen Betriebszustandes zu erfüllen, und in der Tat wird auch eine bemerkenswerte Annäherung, namentlich in der Erfüllung der Forderungen 1 und 2 erreicht. Ungenügend ist dagegen auch bei diesem Prüfstande die Erfüllung der Forderungen 3 und 4, während 5 vollständig ausgeschlossen ist. Alle übrigen der genannten Konstruktionen verzichten von vornherein auf jede Nachahmung des Flugbetriebes. Die Prüfung auf ihnen hat also nur einen sehr bedingten Wert.

Besonders ungünstig verhalten sich die meisten Pendelrahmen dieser Gruppe bei der Aufnahme der Erschütterungen (Ford. 1). Als typisch kann das Verfahren der N.A.G. mit ihrem Prüfstande gelten. Die Beanspruchungen der den Motor tragenden Walzeisen durch die Vibrationen waren so stark, daß das Material überbeansprucht wurde. Anstatt nun den Motor durch elastischere Lagerung ausschwingen zu lassen, suchte man durch Verstärkung der Walzeisen die Erschütterungen zu verhindern. Die Folge war davon, daß nunmehr der Rahmen ganz starr blieb, dafür aber die Kugelpendellager die Stöße, denen sie nicht gewachsen waren, aufnehmen mußten.

Zur Erfüllung der für eine exakte Bestimmung notwendigen Forderungen 8 bis 10 machen diese einfachen Konstruktionen meist ebenfalls keine Anstalten. Dagegen ist die Festigkeit (Ford. 11) stets ausreichend, meist sogar übertrieben (vgl. oben). Die Empfindlichkeit ist leidlich gut, da die Reibung wegen der geringen Anzahl der vorhandenen Lager klein ist, erreicht jedoch nicht die Empfindlichkeit von Pendelrahmen mit Schneidenlagerung.

Ein Maß für den Reibungswiderstand kann man sich schaffen, wenn man den »mittleren« Radius der Traglager angibt. Bei der Berechnung dieses »Reibungsradius« ist jedes Lager mit dem Wertungsfaktor heranzuziehen, der seinem Anteil an der Last entspricht. Für die abgebildete Konstruktion der Firma Benz ergibt sich ein Reibungsradius von ca. 55 mm. Die Verkleinerung durch Anwendung von Kugellagern ist dabei nicht berücksichtigt. Es sei hierbei jedoch darauf hingewiesen, daß der Reibungsradius allein kein Maß für die Empfindlichkeit einer Konstruktion ergibt, denn die die Lager belastenden Drücke fallen bei den verschiedenen Anordnungen sehr verschieden aus.

Die sehr erwünschte Dämpfung durch die Trägheit des Systems ist gering, weil die Massen sich um die Pendelachse selbst zusammendrängen. Um so mehr muß bei diesen Bauarten auf sorgfältige Erfüllung der Forderung 16 (Flüssigkeitsdämpfung) gesehen werden.

Bei sorgfältiger Ausführung können wahrscheinlich leidlich genaue Meßresultate erzielt werden, wenigstens stellt der Luftschiffbau »Zeppelin« eine größte Abweichung von 1,4% zwischen der Pendelrahmenmessung und elektrischer Bremsung fest. Inwieweit freilich die elektrische Bremsung fehlerfrei war, läßt sich nicht ohne weiteres angeben. Exakte wissenschaftliche Bedürfnisse kann diese Genauigkeit in keinem Falle befriedigen. Vielleicht läßt sich jedoch die Genauigkeit dieser Bauart bis auf die guter Pendeldynamos gleicher Anordnung steigern. Für diese gibt die Firma Dr. Max Levy die Genauigkeit zu ½% an.

Die Messung des Axialschubes erfordert eine Beweglichkeit des Motors in der Fahrtrichtung. Diese kann durch Fahrbarkeit des ganzen Standes, wie bei Benz, oder nur des den Motor tragenden Teiles, wie bei den festen Prüfständen der N.A.G., oder durch Drehbarkeit um eine Querachse, wie bei Professor Scheit, erreicht werden. Alle diese Anordnungen, sowie die bei anderen, später zu besprechenden Bauarten angewandten Möglichkeiten entsprechen den aus der Erprobung von Luftschrauben bekannten Konstruktionsdetails. Es handelt sich hierbei ja auch eigentlich mehr um eine Prüfung der Luftschraube als des Motors, weshalb hier auf ein näheres Eingehen verzichtet werden kann. Über die entsprechenden Einrichtungen zur Prüfung von Propellern findet man Ausführliches im Buche von Bejeuhr »Die Luftschrauben«.

Das Wiegen des Motors auf dem Rahmen selbst ist nicht möglich (Ford. 19), dagegen ist es leicht, die Wägung des Drehmoments für den umgekehrten Drehsinn vorzunehmen. Die meisten Pendelrahmen besitzen Gewichtsschalen auf beiden Seiten.

Der Schutz des Bedienungspersonals wurde bei den Versuchsständen der N.A.G. sehr zweckmäßig durch elastische Wellblechwände erreicht. Diese bewähren sich besser als starre Holzwände.

2. Lager hinter dem Motor.

Den auffälligsten Mißstand der vorigen Konstruktionsgruppe bildet das Hohlzapfenlager vor dem Motor. Die das Lager tragenden Konstruktionsteile stören die Luftbewegung und erschweren auch sonst die Erfüllung der Forderungen A. Dazu kommt, daß der Reibungsradius dieses Lagers verhältnismäßig groß wird. Es erscheint daher durchaus wünschenswert, das vordere Lager fortzulassen und nur das hintere Lager zu benutzen. Das ist dann möglich, wenn man die Rahmenkonstruktion über das hintere Lager hinaus verlängert und diese Verlängerung so stark belastet, daß das Gewicht des vorderen Teiles mit dem Motor in der Schwebe gehalten wird. Freilich muß dann die ganze Konstruktion erheblich stärker gehalten werden, und der Raumbedarf sowohl wie die Kosten werden sehr beträchtlich. Es sind dieses

auch die Gründe, weshalb ich diese Möglichkeit bei der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt nicht befürwortet habe. Sie stand vor Ausführung des später bekannt gewordenen Pendelrahmens zur Erwägung.

Erfreulicherweise hat man jedoch an anderer Stelle die sehr bedeutenden Kosten nicht gescheut. Das Versuchsfeld von Geheimrat Riedler an der Technischen Hochschule zu Charlottenburg hat daher seit Ende 1912 eine solche Einrichtung im Betriebe.

Eine Beschreibung dieses Versuchsstandes befindet sich in der Technischen Rundschau vom 17. Dezember 1913. Die Bauart ist Gegenstand des dem Dr.-Ing. Becker im September 1913 erteilten Patentes.

Ihr Hauptvorzug besteht in der elastischen Ausgestaltung des Rahmens, die die Erfüllung der Forderung 1 ermöglicht. Freilich erscheint es nach den Ausführungen im ersten Teile richtiger, den Motor möglichst allein schwingen zu lassen und nicht erst auf einem schweren Rahmen starr zu montieren. Auch möchte der Verfasser die Erzeugung der Elastizität durch Holzholme für richtiger halten als die durch Pneumatikreifen.

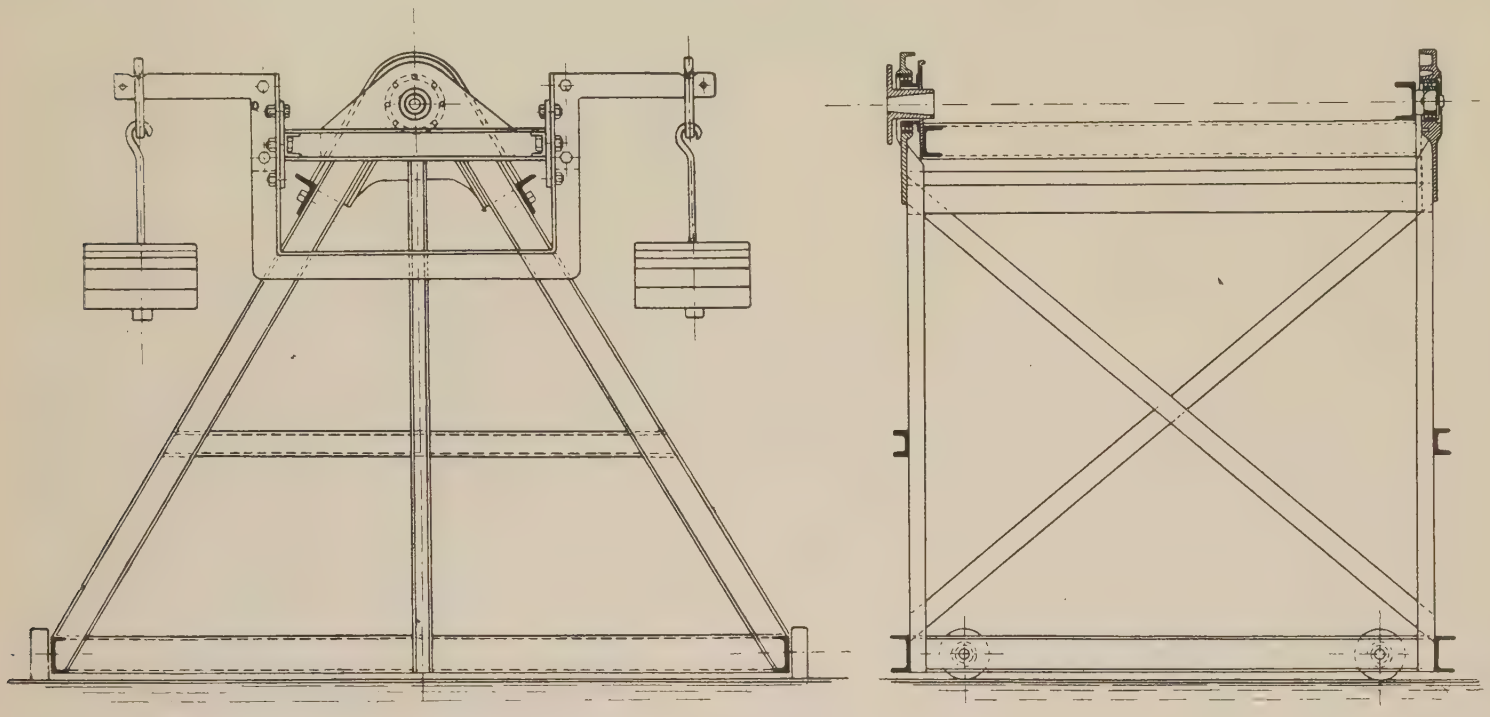

Fig. 12.

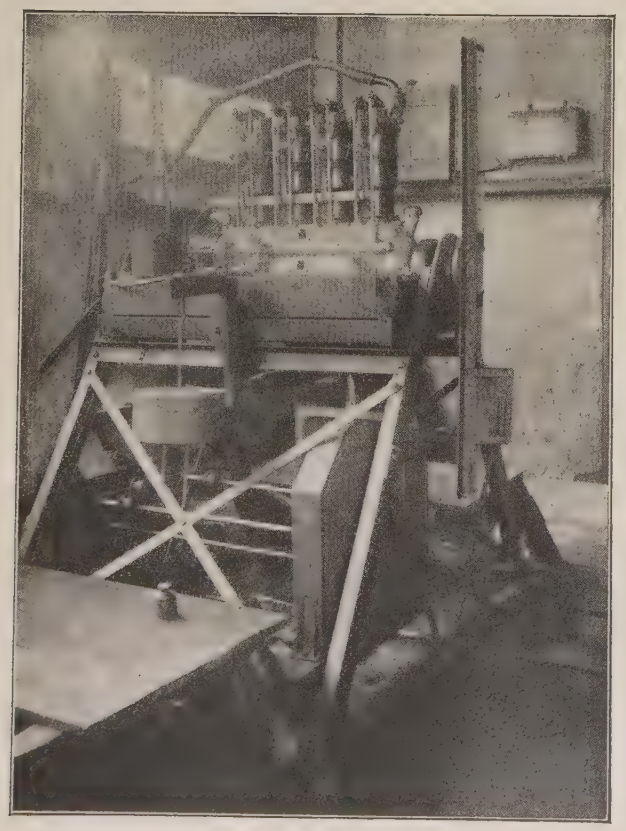

Fig. 13.

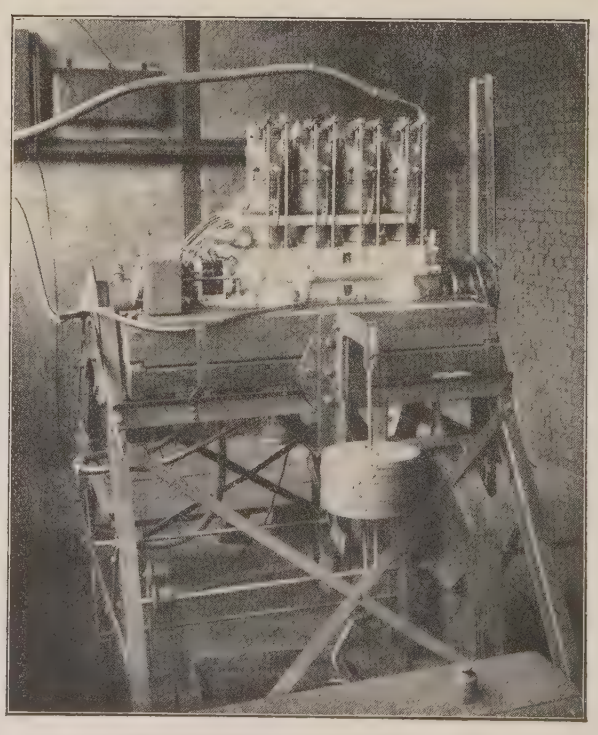

Fig. 14.

Es scheint jedoch, daß die mit der axialen Lagerung regelmäßig verbundenen Mängel, nämlich Störung der Luftbewegung und geringes Trägheitsmoment, trotz des so bedeutenden Aufwandes an Kosten und Raum, welcher diese Konstruktion vor allen anderen auszeichnet, nicht völlig beseitigt werden konnten.

Ein abschließendes Urteil wird man sich selbstverständlich erst nach der Veröffentlichung von Versuchsresultaten bilden können.

Mit der Riedlerschen Bauart hat der neue Pendelrahmen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, der in zehn Exemplaren für den Dauerlauf beim zweiten Motorenwettbewerb verwendet werden sollte, den nach vorn hervorragenden Aufbau für den Motor und die Erzeugung der Elastizität durch Zwischenschaltung von Pneumatikreifen gemeinsam. Ein weiterer Fortschritt ist dadurch erreicht, daß der Motor in ein Gehäuse eingekleidet ist, das einem Flugzeugrumpfe ähnelt und mit einer wesentlich geringeren Masse gekoppelt ist.

Die Konstruktion, welche von Seppeler stammt, hat eine gewisse Verbreitung über das Reich erlangt. Eigene Erfahruugen über dieselbe besitzt der Verfasser nicht. (Vgl. Seppeler, Jahrbuch der wiss. Ges. f. Luftfahrt 1914/1915.)

Leider ist auch bei dieser Bauart auf die Erfüllung wichtiger Forderungen wie 4 und 5 verzichtet worden, so daß zur Ergänzung immer die Prüfung auf anderen Prüfständen notwendig ist. Hierfür können allerdings teilweise die im folgenden Abschnitte beschriebenen Versuchsstände benutzt werden.

3. Pendelung um eine ideelle Achse.

Wenn keine der beiden in den ersten Abschnitten erörterten Anordnungen genügen, liegt das Problem folgendermaßen: Die Bewegung des Systems um die Motorachse soll erzwungen werden, ohne daß Führungslager in der Motorachse selbst liegen. Nachdem also im zweiten Abschnitt auf das vordere Lager verzichtet worden ist, fällt nunmehr auch noch das hintere fort.

Dem in der Kinematik Bewanderten wird unschwer eine Reihe von Möglichkeiten zur Lösung dieses Problems einfallen. Praktische Gestaltung hat jedoch bisher nur diejenige gewonnen, welche der Konstruktion der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt zugrunde liegt. Diese ist in der Z. d. V. D. I. am 16. November 1912 beschrieben. Die dort wiedergegebene Abbildung des Pendelrahmens ist stark schematisiert, wodurch leider ein sehr wesentliches Detail, nämlich der Hebel für die Reduktion der Meßgewichte mit dem auswechselbaren Gestänge für die Prüfung in beiden Drehrichtungen (Ford. 22) in Fortfall kommt. Ich gebe daher als Ergänzung in Fig. 15 eine Abbildung des oberen Wagebalkens, wie er ursprünglich wirklich ausgeführt wurde. Fig. 16 zeigt eines der acht an den Hängestangen verwendeten Cardangelenke. Die Ausführung der Hauptteile geschah durch die Firma A. Dinse in Reinickendorf.

Der kinematische Ersatz der axialen Lagerung durcn sog. Bewegungsparallelogramme ist der Deutschen Versuchsanstalt durch D.R.P. geschützt worden. Bezüglich dieses Prinzips, sowie des Begriffes »Bewegungsparallelogramm« verweise ich auf die von mir seinerzeit ausgearbeitete und am 15. Mai 1913 erschienene Patentschrift Nr. 259924.

Die Konstruktion sucht soweit als möglich die Prüfung unter natürlichen Bedingungen zu ermöglichen.

Dieses Ziel ist zwar nicht völlig erreicht worden. Immerhin stellte die Anlage der Deutschen Versuchsanstalt insofern einen Fortschritt dar, als in Deutschland zum ersten Male im größeren Maßstabe an die Lösung dieses Problems herangetreten wurde.

Der Rahmen besitzt infolge seiner Aufhängung an den vier dünnen Stangen eine erhebliche Elastizität.

Richtiger wäre es freilich gewesen, die Möglichkeit zum Ausschwingen dem Motor allein zu geben, während er mit dem massiven Rahmengestelle und den hölzernen Montagebalken starr verbunden war. Auch waren die Pendelstangen immer noch nicht elastisch genug, um die Vibrationen derjenigen Motoren, welche besonders große Erschütterungen zeigten, ohne dauernde Formänderung auszuhalten. Bei solchen Motoren gerieten sie in saitenartige Schwingungen, deren Amplitude ein Maß für die Stärke der Erschütterungen abgeben konnte. Die Forderung 1 war demnach bis zu einem gewissen Grade erfüllt.

Eine noch günstigere Anordnung wurde für die sog. Nachversuche geschaffen. Bei diesen wurden die massiven Holzbalken durch schwächere mit Durchbrüchen versehene Traghölzer ersetzt. Diese schwächere Konstruktion war als Verschlechterung der Prüfungsbedingungen gedacht, während sie nach den Ausführungen im ersten Teile die Prüfung erleichtern mußte. Es zeigte sich dementsprechend, daß keiner auch

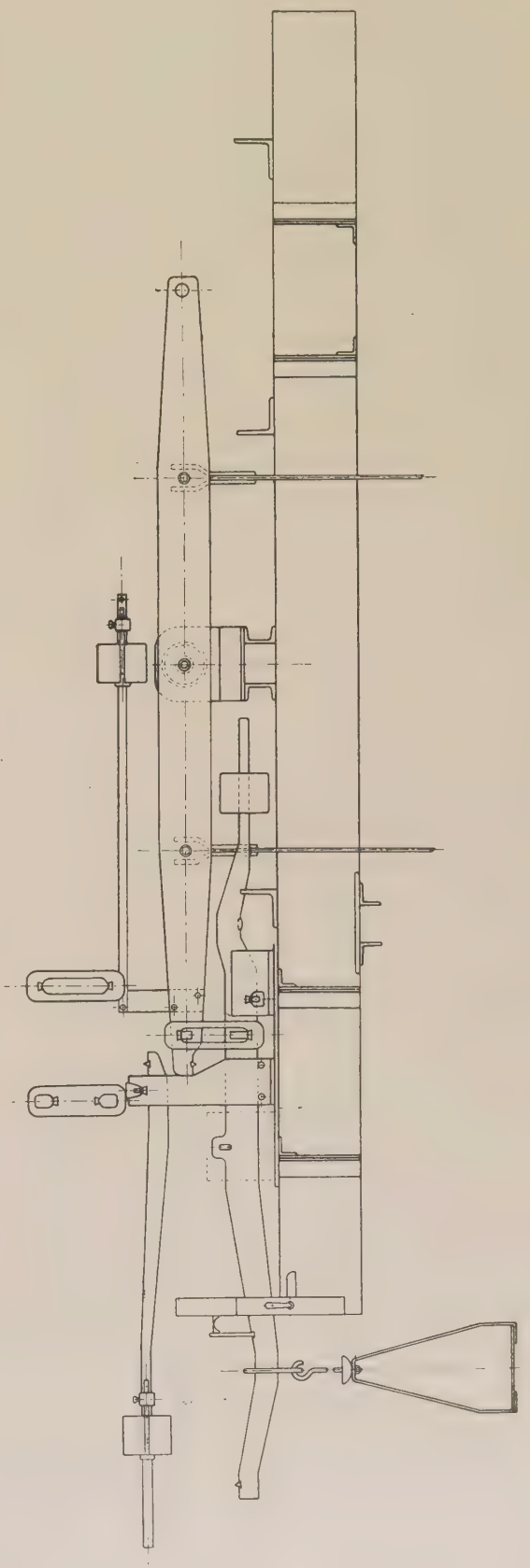

Fig. 15.

der Motoren bei der Nachprüfung größere Schwierigkeiten hatte, als beim Hauptversuch. Diese Erleichterung war allerdings nicht sehr bedeutend, da die Elastizität des Aufbaues nur wenig verbessert wurde.

Die Luftschraube hatte ausreichenden Spielraum (Ford. 21), der Luftzug war nicht wesentlich stärker behindert als im Flugzeuge (Ford. 3), was den wesentlichsten Vorzug der Bauart bildet.

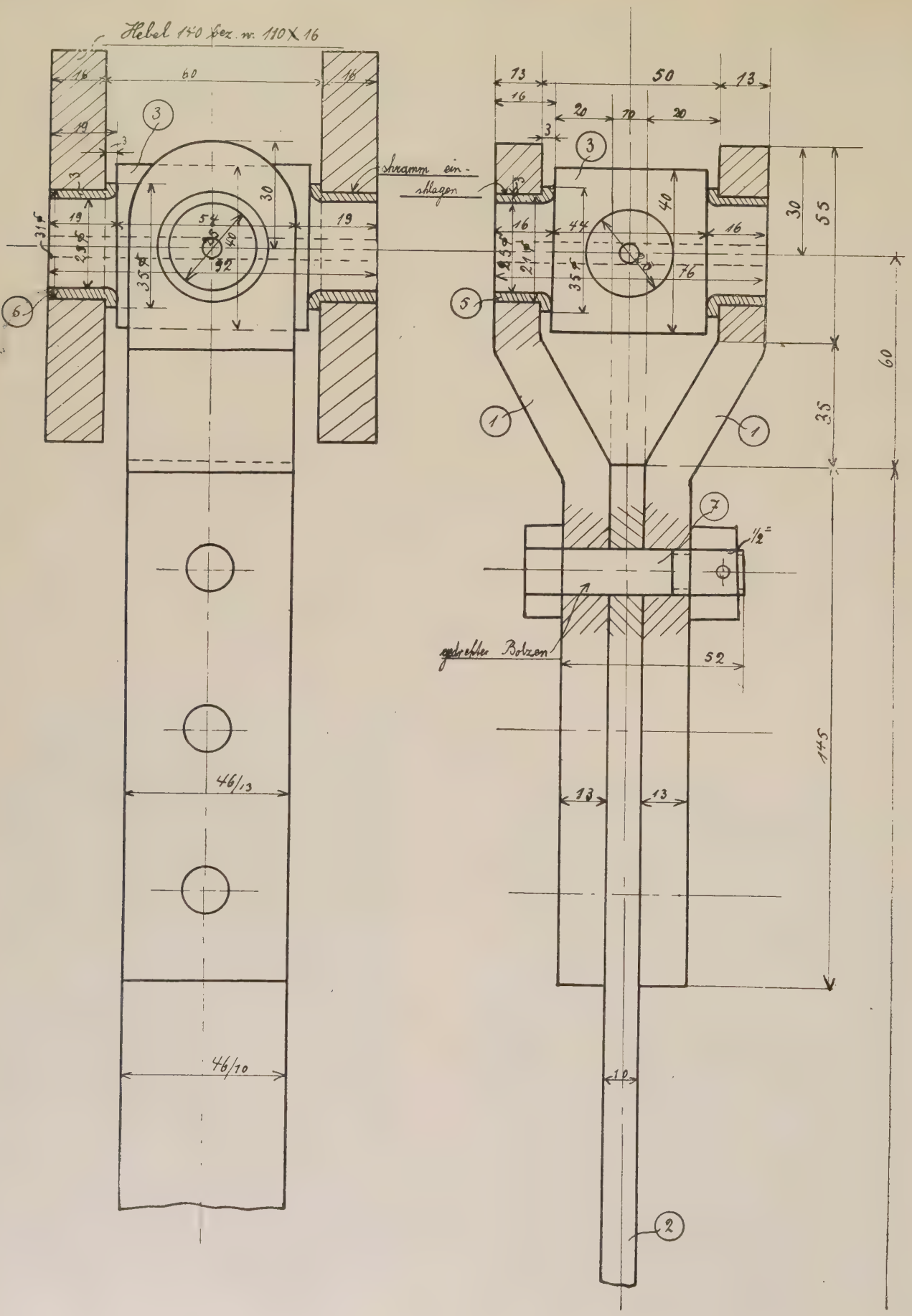

Fig. 16.

Die Schrägstellung konnte nach vorn und hinten um 15° bzw. 10° im Betriebe vorgenommen werden. Für den damaligen Stand der Flugtechnik, die noch nicht die »Looping the Loop-Flüge« kannte, war diese Neigung zweifellos ausreichend. Ein Mangel lag darin, daß dem Motor keine erhebliche Schrägstellung nach der Seite gegeben werden konnte. Eine Einrichtung dafür hätte die Bauart ohne weiteres zugelassen, sie war aber in den Wettbewerbsbestimmungen nicht verlangt worden.

Die Messung des Drehmoments schloß leider nicht alle Fehlerquellen aus. Zwar waren die störenden Einzelkräfte (Ford. 6) dadurch ausgeschaltet, daß die ideelle Pendelachse mit der Motorachse zusammenfiel, aber die Berücksichtigung der Auspuffreaktion (Ford. 7) war nicht vorgesehen (vgl. S. 16).

Die Unempfindlichkeit war erheblich, was sich aus folgenden Umständen erklärt: Die Anordnung verlangt, daß das gesamte Gewicht des Motors einschließlich des schrägen Pendelrahmens dreimal von Lagern getragen wird, nämlich erstens von den vier unteren Zapfenlagern der Hängestangen, zweitens von den vier oberen und drittens von den festen Lagern der Wagebalken. Zwar sind die Reibungsradien der Zapfenlager (Fig. 16) geringer als bei den im ersten Abschnitt beschriebenen Anordnungen, aber ihre erste Ausführung als Gleitlager gleicht diesen Vorteil mindestens aus. Später sind die Zapfen durch Schneiden ersetzt worden, wodurch eine größere Empfindlichkeit erzielt wurde.

Das Trägheitsmoment aller bewegten Teile ist bei dieser Anordnung etwas größer als bei den vorher erörterten. Daher konnte teilweise auf die Flüssigkeitsdämpfung verzichtet werden, die nicht immer zur Zufriedenheit arbeitete. Dieselbe war an dasjenige Ende des Hauptwagebalkens angeschlossen, welches dem Wägegestänge gegenüberlag. Die zwischen ihr und den Rahmen sowie auch der Wägestelle liegenden Konstruktionsteile vereitelten jedoch durch ihre Elastizität größtenteils die beabsichtigte Wirkung.

Ebenfalls schlecht bewährt hat sich das Getriebe, welches zur Übertragung der Tourenanzeige auf ein Tachometer und auf einen registrierenden Tourenzähler diente. Die damit verknüpften Mißstände werden jedoch leicht durch Benutzung

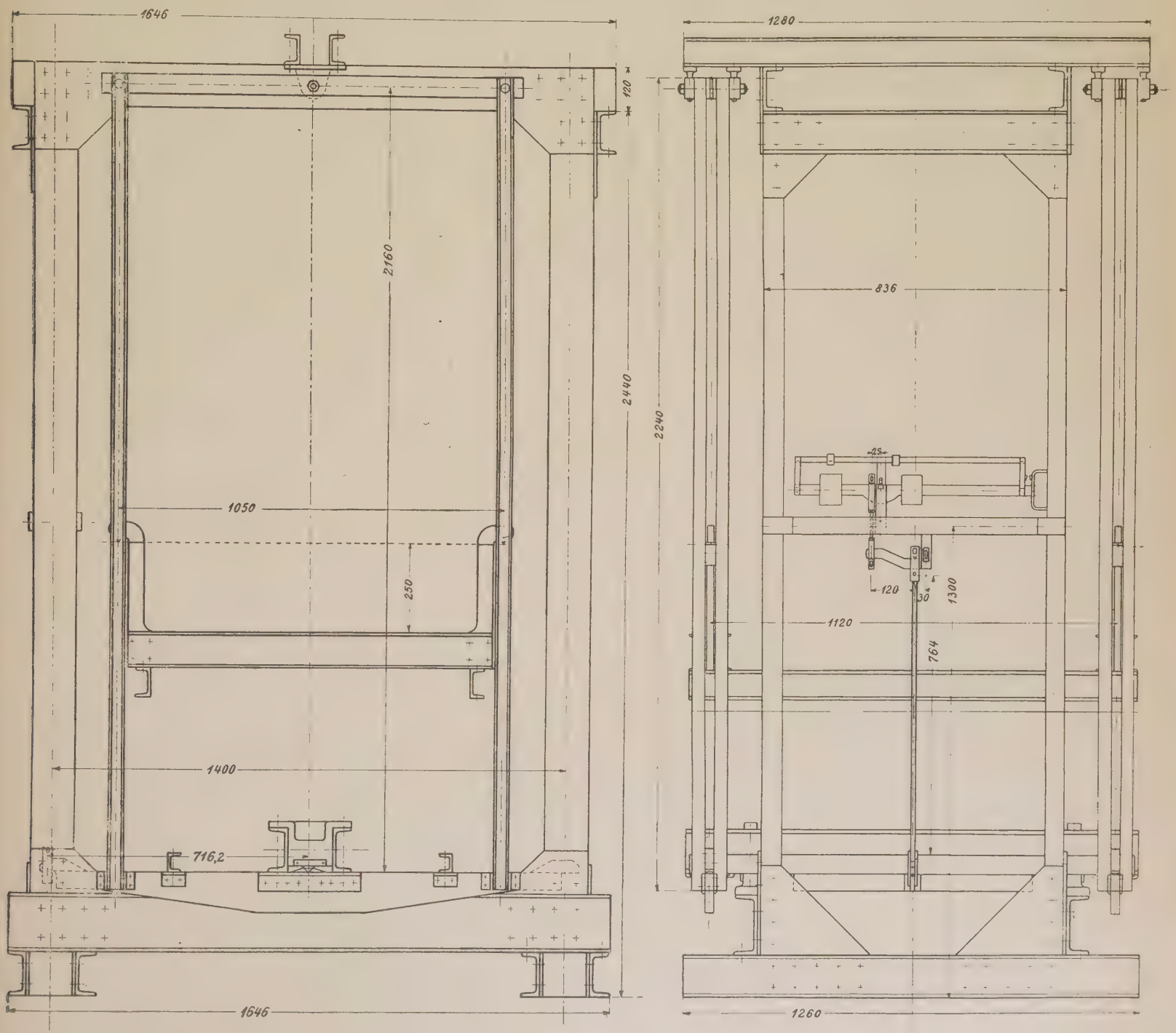

Fig. 16a.

eines stroboskopischen Tourenzählers vermieden werden (vgl. S. 31).

Die Axialschubmessung ist durch die Ausbildung der Stangenlager als Cardangelenke in befriedigender Weise ermöglicht. Ausgeschlossen ist dagegen auch bei dieser Anordnung die Wägung des fertig montierten Motors.

Die allgemeinen Forderungen (C) bieten zu Beanstandungen keinen Anlaß.

Im Anschluß an die Veröffentlichung dieser Konstruktion hat Madelung in der Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt auf eine andere Möglichkeit aufmerksam gemacht, die Bewegung um die Motorachse kinematisch zu erreichen, ohne übermäßig viele Lagerstellen zu benutzen. Der Vorschlag ist theoretisch interessant, bietet aber konstruktive Nachteile, welche Professor Bendemann zum Teil in der nächsten Nummer der genannten Zeitschrift hervorgehoben hat. Richtig ist es, wenn Madelung betont, daß es für eine korrekte Messung in der Nullage genügt, wenn das momentane Drehzentrum mit der Motorachse zusammenfällt. Die Anordnung der Deutschen Versuchsanstalt besitzt jedoch nicht nur momentan, sondern dauernd die richtige Pendelachse, was die praktische Ausführung korrekter Messungen erheblich erleichtert.

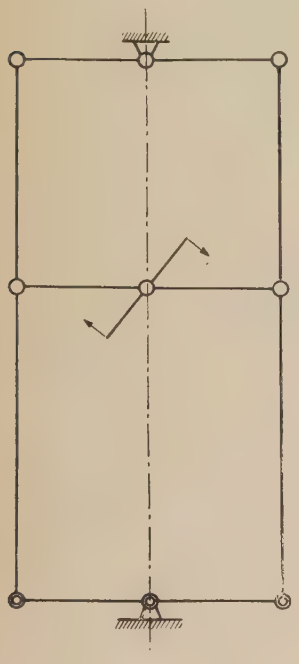

Fig. 16b.

Um eine ideelle Achse pendelt auch der Pendelrahmen, den Professor Baer im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule zu Breslau erbaut hat. Die Anordnung dieses Pendelrahmens ist aus der in Fig. 16a dargestellten Vorderansicht zu erkennen. Fig. 16b zeigt die kinematischen Elemente des Bewegungsmechanismus in schematischer Darstellung.

Die Pendelung um die Motorachse wird ebenso wie bei der Deutschen Versuchsanstalt durch Bewegungsparallelogramme erreicht. Doch ist die konstruktive Ausbildung dieses Grundprinzips eine wesentlich andere und einfachere, indem nur ein vertikales Doppelparallelogramm ausgebildet wurde.

Da der Prüfstand in erster Reihe der Prüfung von Automobilmotoren dienen soll, ist darauf verzichtet worden, die festen Konstruktionsteile so weit vom Motor zu entfernen, daß der Strahl einer Luftschraube ungehindert hindurchblasen könnte. Auch ist die Höhe der Motorwelle über Fußboden für den Betrieb einer normalen Luftschraube zu gering. Es ist jedoch ohne weiteres möglich, dieselbe Konstruktion auch für einen Prüfstand von Flugmotoren anzuwenden, wenn man die Abmessungen in der notwendigen Weise vergrößert.

Die meßtechnischen Vorzüge der Bauart sind bedeutend. Hauptsächlich durch die zweckmäßige Ausbildung aller wesentlich belasteten Gelenke als Schneidenlager und durch zweckmäßige Anordnung der Schneiden und Pfannen ist eine hohe Empfindlichkeit und dauernde Genauigkeit der Meßanzeige erreicht worden.

Die Laufgewichtswägung gestattet die bequeme Messung von Drehmomenten beider Drehsinne, dürfte jedoch für die Prüfung der gefährlichen Flugmotoren etwas zu nahe am Motor liegen.

Die Bauart ist als Gebrauchsmuster geschützt worden. Näheres über dieselbe findet sich in der Z. d. V. D. I. vom 12. September 1914.

B. Pendelrahmen mit desaxialer Lagerung.

Wir haben gesehen, daß sämtliche Pendelrahmen mit axialer Lagerung erhebliche konstruktive Schwierigkeiten bieten, wenn der Aufbau nicht nur die Forderung der axialen Pendelung, sondern auch die übrigen, im ersten Teile entwickelten Konstruktionsbedingungen erfüllen soll. Auch die Anordnung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt hat nicht alle Schwierigkeiten restlos beseitigt.

Es liegt daher nahe, zu prüfen, ob nicht von der Bedingung der Pendelung um die Motorachse abgegangen werden kann, ohne daß die Messung fehlerhaft wird oder wenigstens, ohne daß die dadurch bedingten Fehler unzulässig groß werden. Dieser Versuch, welcher auf den ersten Blick wenig Erfolg versprechen mag, ist um so notwendiger, als eine Reihe der berufensten Stellen schon vor längerer Zeit, jedenfalls vor der Erbauung der Prüfstände der Deutschen Versuchsanstalt und der Technischen Hochschule zu Charlottenburg, Pendelrahmen mit desaxialer Lagerung benutzten.

1. Pendelung um feste Lager.

Nachdem die Forderung der axialen Lagerung fallen gelassen worden ist, kann der Aufbau des Motors auf dem Pendelrahmen in zweckentsprechender Weise leicht bewirkt werden, wobei die Anordnung der Pendellager über oder unter dem Motor oder seitlich stattfinden kann. Die seitliche Lagerung hat bisher keine Freunde gefunden, während die Lagerung unter dem Motor in Frankreich vorzuherrschen scheint.

Die wichtigste französische Prüfanlage ist die des Automobile Club de France, und hier finden wir auch die älteste größere Pendelrahmenanlage zur Prüfung von Flugmotoren. Sie ist beschrieben im »Bulletin Officiel« der technischen Commission des Clubs vom Juni 1911 unter dem Titel »Plateforme Dynamometrique«. Prüfresultate und weitere Bemerkungen über die Anlage finden wir bei M. G. Lumé, »Résultats et Interprétation d'Essais de Moteurs d'Aviation«.

Die erwähnten Veröffentlichungen betonen bereits die Notwendigkeit, die Prüfungsbedingungen dem Flugbetriebe anzupassen. Demgemäß sind auch in mancherlei Hinsicht die Forderungen unter A erfüllt.

Der hohe, freie Aufbau des Motors auf zwei unversteiften Holzbalken, die sich ihrerseits auf hohe Winkeleisen stützen, bietet eine gewisse Elastizität (Ford. 1), läßt den Windflügeln reichlich Spielraum (Ford. 2) und behindert nicht den Luftzug (Ford. 3). Freilich hat man bald die Erfahrung gemacht, daß der von der Schraube erzeugte Luftstrom ein Drehmoment auf den Pendelrahmen ausübt, weshalb zur Ergänzung der Prüfungen mittels Luftschraube Prüfungen mit Windflügeln unbedingt erforderlich sind. Diese Ergänzungsprüfungen, die beim Wettbewerb im Dezember 1911 auch vorgenommen wurden, besaßen demzufolge nicht den Vorteil der korrekten Luftströmung.

Eine Schrägstellung der Motoren sieht die Konstruktion nicht vor, ebensowenig die Einschließung in eine luftdichte Kammer, welche jedoch bei dieser Bauart ausführbar erscheint.

Etwaige durch die Drehachse gehende Einzelkräfte besitzen mit Bezug auf die Pendelachse einen erheblichen Hebelarm und geben daher zu Meßfehlern Veranlassung, und es scheint, daß dieselben gar nicht beachtet wurden, eine Vernachlässigung, welche dem Verfasser sehr bedenklich erscheint.

Noch bedenklicher dürfte nach den vorher angestellten Erörterungen im Zusammenhang damit die Vernachlässigung der Auspuffreaktion sein. Die veröffentlichte Abbildung des gesamten Prüfstandes zeigt einen Motor, dessen Auspuffrohre mit Bezug auf die Pendelachse einen Hebelarm von ca. 1 m haben. Dieser ist bedeutend größer als bei axialer Pendelung möglich wäre. Der Meßfehler berechnet sich nach S. 16 zu ca. 5,4 mkg für einen 100 PS-Motor oder zu rd. 10%. Bei dem abgebildeten Motor dürfte die Leistung um etwa diesen Betrag zu klein gemessen worden sein.

Den veröffentlichten Prüfungsergebnissen kann demnach nur wenig Wert zugesprochen werden.

Die sehr sorgfältige Ausbildung der Pendellagerung und der Wägevorrichtung läßt vermuten, daß die Empfindlichkeit des Rahmens recht gut ist. Der Reibungsradius ist sehr gering. Die Last wird bei der vorliegenden Anordnung nur einmal von Lagern getragen. Das Trägheitsmoment des Pendelsystems ist groß, weshalb trotz der guten Empfindlichkeit eine genügende Dämpfung vorhanden ist. In dieser Beziehung sind die desaxialen Rahmen den axialen bedeutend überlegen.

Nebenbei sei erwähnt, daß das Laboratorium eine vorzügliche Einrichtung zur stroboskopischen Tourenmessung besitzt, wodurch am Pendelrahmen eine besondere Einrichtung dafür gespart wird.

Eine axiale Schubmessung ist nicht vorgesehen, könnte aber leicht angebracht werden.

Das Auswiegen des Motors im montierten Zustande erscheint möglich, da der Motor mit Bezug auf die Pendelachse auch einen seitlichen Hebelarm besitzt. Aus den Prüfungsberichten ist nicht zu ersehen, ob von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht wurde.

Im Prinzip ähnlich, aber viel primitiver ist der kleine Pendelrahmen, den die französische Gnôme-Motoren-Gesellschaft ihren Kunden zur Bremsung der Gnôme-Motoren lieferte. Der einfache fahrbare Rahmen (vgl. Z. d. V. D. I. vom 8. III. 1913) ähnelt äußerlich den im ersten Abschnitte beschriebenen Bauarten, unterscheidet sich jedoch von diesen dadurch, daß die Pendelung um eine unter dem Motor gelagerte Achse stattfindet. Ebensowenig wie jene ist diese Ausführung wissenschaftlichen Anforderungen gewachsen. Freilich dürften ihre Herstellungskosten sehr gering sein.

Die Daimler-Motoren-Gesellschaft hat sowohl in ihrem Stammhaus in Untertürkheim als auch in ihrer Motorenfabrik in Marienfelde Pendelrahmen errichtet, die in mehrfacher Hinsicht bemerkenswert sind. Da Veröffentlichungen über die Konstruktion nicht existieren, kann leider nur kurz auf dieselbe eingegangen werden.

Die Aufhängung des Motors an Stangen ermöglicht eine gewisse Freiheit der Schwingung und war für die Konstruktion der Deutschen Versuchsanstalt (vgl. S. 27) vorbildlich. Sie hat die bereits oben erwähnten Vorzüge.

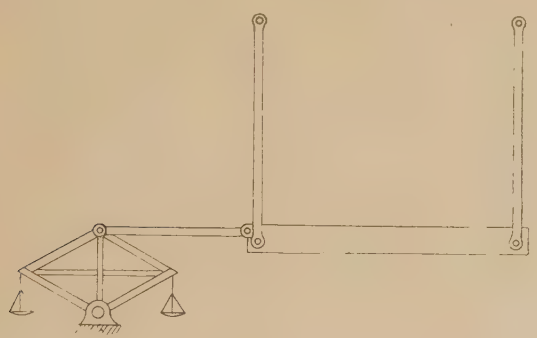

Fig. 17.

Besonders günstig ist es, daß der Pendelrahmen auf einem hohen Gerüst in freier Luft steht. Freilich wird bei rauhem Winterwetter der Betrieb für Personal und Motor sehr unangenehm.

Eine Schrägstellung des Pendelrahmens ist nicht vorgesehen. Auch die Einschließung in eine luftdichte Kammer ist bei der vorhandenen Ausführung nicht tunlich.

Die Drehmomentmessung ist mit mehreren Fehlern behaftet, so daß der Pendelrahmen wohl zum Vergleich ähnlicher Motoren derselben Firma, nicht aber zur Erprobung wesentlich verschiedener Bauarten geeignet ist. Da die Firma Daimler bekanntlich mit der Ausarbeitung neuer Typen, wie hängender Motoren, Stahlzylindermotoren usw., bahnbrechend vorangeht, dürfte gerade für diese Firma eine mangelhafte Messung vom Übel sein.

Die Fehler rühren hauptsächlich her aus Verstößen gegen die Forderungen 6 und 7. Sowohl das Fehlerdrehmoment von einzelnen Kräften mit Bezug auf die Pendelachse als auch das Fehlerdrehmoment der Auspuffreaktion wird bei den Messungen der Firma außer acht gelassen.

Sehr günstig ist dagegen bei diesem Pendelrahmen die Dämpfung durch die Trägheit des Systems. Dieser Vorteil wird hauptsächlich durch die schweren weit ausladenden Träger für die Aufnahme der Meßgewichte erreicht. Die robuste und in den Ausmaßen reichliche Ausführung läßt auch die Anbringung einer Antriebsmaschine (Ford. 8) oder einer Rüttelvorrichtung (Ford. 14) als gut möglich erscheinen. Soweit mir bekannt ist, ist allerdings von diesen Möglichkeiten kein Gebrauch gemacht worden.

Die Einrichtung zum Messen des Axialschubes gibt eine einfache und zweckmäßige Lösung der Aufgabe, den Axialschub in beiden Richtungen feststellen zu können. Sie ist in Fig. 17 schematisch dargestellt.

Die Wägung des Motors im montierten Zustande ist leider nicht vorgesehen.

2. Pendelung um Metazentrum.

Ein besonders eigenartiger Weg zur Lösung des vorliegenden Problems besteht darin, daß man den Pendelrahmen durch einen Schwimmkörper ersetzt. Auf diesem Schwimmkörper wird dann der Motor in Betrieb gesetzt und unter dem Einfluß der Motorreaktion sucht sich der Schwimmkörper um sein Metazentrum zu drehen. Das auftretende Drehmoment kann nun auf zweierlei Art gemessen werden.

Bei der ersten Art dimensioniert man den Schwimmkörper so, daß er nach erfolgtem Ausschlag wieder eine Gleichgewichtslage findet und mißt die Größe des Ausschlages. Nach vorangegangener Eichung der dazu nötigen Winkelskala mit Gewichten von bekannter Größe und bekanntem Hebelarm ist man dann in der Lage, das vorhandene Drehmoment abzulesen.

Das die tragende Flüssigkeit enthaltende Gefäß braucht nur wenig größer zu sein, als der Schwimmkörper selbst ist. Versuche mit solchen Einrichtungen haben im Auslande mehrfach stattgefunden.

Bedeutend vorteilhafter erscheint die andere Möglichkeit, welche darin besteht, daß das Drehmoment jedesmal sofort durch Gegengewichte ausgeglichen wird. Dabei behält nämlich der Schwimmkörper immer seine normale Lage, wodurch zwei entscheidende Vorteile erreicht werden: Erstens kommt die schwierige Bestimmung des jeweiligen Drehzentrums in Fortfall. Dasselbe ist vielmehr stets das gleiche. Seine Kenntnis ist wegen der oben erörterten Fehlerquellen unbedingt notwendig. Zweitens ermöglicht die stets aufrechte Stellung des Schwimmkörpers die Ausbildung desselben als Schiff. Der Versuch kann dann in freier Fahrt vorgenommen werden, wobei in mancherlei Hinsicht eine vollkommenere Anpassung an den wirklichen Flugbetrieb erreicht wird als dieses bei einem festen Prüfstande je möglich wäre. Freilich verursacht die Mitnahme des Personals und die Zufälligkeiten von Wind und Wellen mancherlei Störungen, und es scheint mir fraglich, ob bei einem solchen Fahrbetriebe eine ähnliche Exaktheit der Messungen erreicht werden kann, als bei einem gut ausgebildeten ortsfesten Prüfstande.

3. Pendelung um bewegliche Lager.

Wir haben gesehen, daß sämtliche Pendelrahmen mit desaxialer Lagerung wohl große Vorteile besitzen, nämlich in bezug auf den freien Aufbau des Motors und das große Trägheitsmoment des schwingenden Systems, aber mit erheblichen Fehlerquellen belastet sind. Anderseits war die Pendelung mit axialer Lagerung zum Teil von diesen Fehlerquellen frei, aber mit Bezug auf die beiden oben erwähnten Punkte minderwertig und dazu schwerfällig und teuer. Es gilt also, eine Konstruktion zu schaffen, welche die Vorzüge beider Systeme ohne deren Nachteile vereinigt.

Die Lösung dieser Aufgabe erblickt der Verfasser in der von ihm vorgeschlagenen Anordnung. Dieselbe beruht auf dem Grundgedanken, daß für die Messung auch die Stützkräfte benutzt werden, welche in dem Pendellager auftreten. Sind diese bekannt, so kann die genaue Bestimmung des reinen Drehmoments auch bei desaxialer Lagerung erfolgen (vgl. D.R.P. 270275). Um die angestrebten konstruktiven Vorteile zu erreichen, genügt eine seitliche Verschiebung der Pendelachse aus der Motorachse, während die Höhenlage ungeändert bleiben kann. Dann genügt auch die Messung der vertikalen Komponente des Lagerdruckes.

Diese Anordnung ist in Fig. 18 schematisch dargestellt. An der Motorwelle A greift das Drehmoment M_d und die Einzelkraft K an, welche in die Komponenten K_y und K_x zerlegt werden kann. Die Vertikalkomponente des Lager-

druckes sei P_y. Das Meßgewicht sei Q. Es gelten offenbar die Gleichgewichtsbedingungen:

$$K_y + Q = P_y$$
$$M_d + bQ = aK_y,$$

aus denen unter Elimination von K_y

$$M_d = aP_y - (a+b)Q$$

folgt. Dabei gelten die positiven Vorzeichen für die Pfeilrichtungen der Fig. 18.

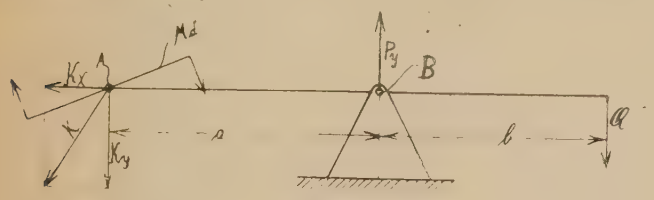

Fig. 18.

Es sind also bei dieser Anordnung im Gegensatze zu allen vorher beschriebenen Pendelrahmen zwei Größen zu messen (P_y und Q). Diesem meßtechnischen Mehraufwande entspricht der Vorteil, daß auch über die Einzelkraft eine Angabe gemacht werden kann. So folgt z. B. aus obigen Gleichungen

$$K_y = P_y - Q.$$

Da man jedoch häufig für diese Angabe geringes Interesse hat, wird man gern auf dieselbe verzichten, um mit einer Messung auszukommen. Dies ist möglich, wenn man die beiden zu messenden Kräfte so auf eine gemeinsame Anzeigevorrichtung wirken läßt, daß ihre Einwirkung den oben errechneten Hebelarmen proportional ist. Konstruktiv läßt sich dies z. B. durch elektrische oder hydraulische Betätigung der Anzeigevorrichtung erreichen, am einfachsten aber durch Anwendung eines Hebels, an welchem die beiden Kräfte mit passenden Hebelarmen angreifen.

Wählt man diese letztere Methode, so erhält man im ganzen ein Hebelsystem, bei dem das Drehmoment des Motors

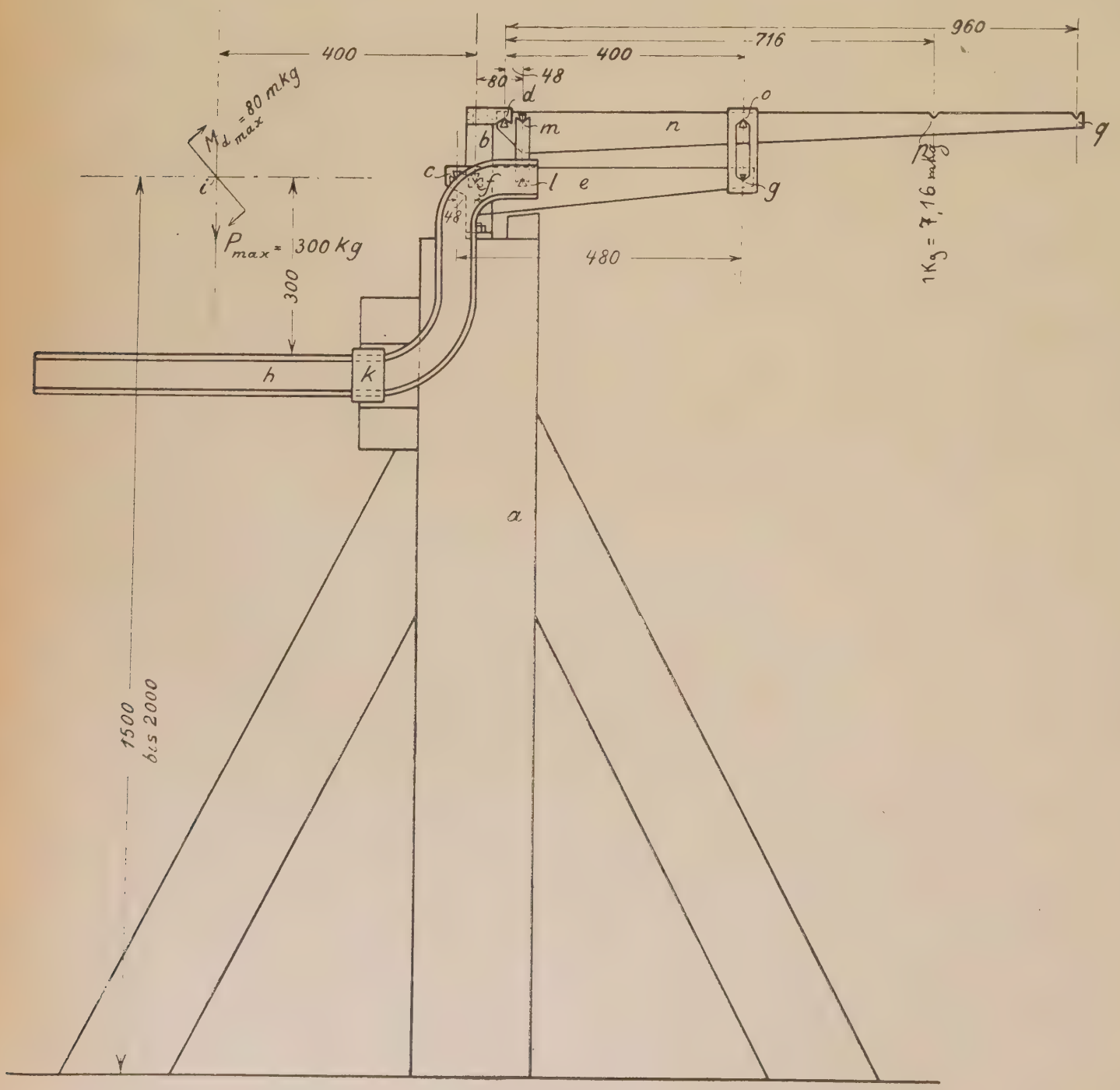

Fig. 19.

durch eine Kraft z. B. ein Gewicht im Gleichgewicht gehalten wird, auf welche Einzelkräfte durch die Motorwelle keinen Einfluß haben. Das ist natürlich nur möglich, wenn ein Ausschlag des gedachten Hebelsystems lediglich eine Drehung und keine Verschiebung der Motorachse bewirkt. In dieser Weise betrachtet, kommt die Anordnung auf einen kinematischen Ersatz der Pendelung um die Motorachse hinaus und ist daher im gewissen Sinne den Bauarten nach Abschnitt A 3 anzugliedern. In der allgemeinen Form der doppelten Messung allerdings unterscheidet sich die Anordnung des Verfassers von der dort aufgeführten Pendelung um eine ideelle Achse grundsätzlich.

Die Messung der Kräfte P_y und Q kann auf jede der üblichen Arten (Gewichte, Dynamometer, Meßdosen) erfolgen und ist daher für die vorgeschlagene Bauart nicht typisch. Zunächst hat der Verfasser die an anderen Stellen am besten bewährte Gewichtswägung in Aussicht genommen. Das diesbezügliche Projekt, das für die Firma Dr. Max Levy in Berlin entworfen wurde, ist in Fig. 19 dargestellt. Diese Skizze zeigt nur den wagentechnischen Teil der Vorrichtung. Die Einrichtungen zur Schrägstellung, elastischen Lagerung u. dgl. lassen sich jedoch, wie leicht einzusehen, ohne Schwierigkeit an dem für den Motoraufbau dienenden Wagenhebel anbringen. Bei der skizzierten Bauart ist die oben erwähnte Reduktion der Doppelwägung auf eine einzige mittels eines besonderen Wägehebels vorgesehen.

Die Wage ist auf einem hölzernen Bocke *a* montiert, dessen Höhe dadurch bedingt ist, daß die Windflügel am Boden vorbeigehen müssen. Auf dem Bocke *a* befindet sich der feste Ständer *b* aus zusammengenieteten Flacheisen, welcher die Pfannen *c* und *d* trägt. Die zu *c* gehörigen Schneiden sitzen in dem Hebel *e*, der aus zwei Flacheisen besteht. Letzterer besitzt außerdem noch Pfannen *f* und Schneiden *g*. In der Pfanne *f* ist die Schneide des Hebels *h* gelagert. Dieser besteht aus zwei gebogenen U-Eisen. Das längere freie Ende von *h* dient zur Aufnahme des Motors. Auf ihm werden Holzbalken und hölzerne Zwischenkeile so angeordnet, daß die Motorwelle genau auf die Mitte *i* eingestellt werden kann. Um diese Einstellung zu kontrollieren, befindet sich ein Stück vor der Wage, ein in der Skizze nicht gezeichneter Pfahl mit einer feinen Bohrung, deren Achse durch *i* geht. Der Hebel *h* besitzt ferner eine Armierung *k* aus Gummi oder Leder, welche bei Schwingungen der Wage an vorstehende Teile des Bockes *a* stößt. Schließlich wirkt der Hebel *h* mittels der Schneide *l* auf ein Gestänge und die Schneide *m* des Hebels *n*. Der Hebel *n* ist einerseits in der festen Pfanne *d* gelagert, anderseits steht er durch die Schneide *o* und ein Gehänge mit der Schneide *g* in Verbindung.

Die Bestimmung des Drehmoments geschieht durch Aufhängung von Gewichten in *p* und zwar sind zur Ausbalanzierung von 7,16 mkg 1 kg-Gewicht notwendig.

Daß Einzelkräfte in *i* auf die Größe des Gewichtes in *p* keinen Einfluß haben, zeigt auch folgende kleine kinematische Überlegung:

Macht der Hebel *n* einen kleinen Ausschlag, so daß sich *o* um den Betrag d_y senkt, so senkt sich *g* ebenfalls um d_y und *m* und *l* um den Betrag $d_y \cdot \frac{48}{400}$. Aus der Betrachtung des Hebels *e* (*c*, *f*, *g*) folgt ferner, daß sich *f* um den Betrag $d_y \cdot \frac{48}{480}$ senkt. An dem Hebel *h*, welcher den Motor trägt, kennen wir also die Verrückungen der Punkte *l* und *f*, welche sich wie 6 : 5 verhalten. Der Pol der Bewegung von *h* liegt also um den fünffachen Betrag des Abstandes *f l* über *l* hinaus oder in *i*, was zu beweisen war.

Soll die Vorrichtung nicht zur Bestimmung des Drehmoments sondern als Wage benutzt werden, so wird das Gehänge zwischen *g* und *o* entfernt. Der Hebel *e* legt sich dann gegen einen Anschlag des Bockes *a* und ist so festgestellt. Die Wägung geschieht durch Aufhängung von Gewichten in *q*, und zwar ist zur Ausbalanzierung von einem Gewichte von 4 kg in *i* ein Gewicht von 1 kg in *q* erforderlich.

Die vorgeschlagene Anordnung ermöglicht die freie Aufstellung des Motors in einer dem Flugbetriebe entsprechenden Weise, ebensogut wie die Anordnungen aus Abschnitt B I.

Selbstverständlich ist der Motor auf Holmen von richtiger Elastizität zu betten. Es eignet sich dafür das auch sonst meist verwendete Holz, jedoch in schwächeren Profilen. Nach den Ausführungen S. 9 ff. wird die Dimensionierung errechnet werden können.

Besonders einfach ist die Schrägstellung des Motors nach der Seite hin. Es genügt dafür die Schwenkung des Hauptwagebalkens. Für die Schrägstellung nach vorn und hinten ist ein geeigneter Bewegungsmechanismus am vorderen Hebelende anzubringen.

Die Veränderung des Auspuffhebelarmes (Ford. 7) kann auf verschiedene Weise erfolgen. Entweder wird nur das Auspuffrohr anders gestellt, wie es auch bei anderen Bauarten möglich ist, oder aber der Motor wird auf dem Wagebalken verschoben. Der letztere Weg erscheint als der korrektere, da dabei dem Motor selbst keinerlei Abweichung von seinen normalen Anordnungen zugemutet wird.

Es ist anzunehmen, daß bei sorgfältiger Ausführung meiner Bauart eine sehr große Empfindlichkeit erreicht werden kann. Das Gewicht des den Motor tragenden Rahmens braucht nicht allzu groß zu sein. Dazu kommt, daß die Lagerstelle seitlich liegt, wodurch man für die zweckmäßige Ausbildung der Lagerung völlig freie Hand gewinnt. Der Reibungsradius wird also sehr klein. Durch Anwendung von Schneiden kann die Empfindlichkeit bis zu der guter Balkenwagen gesteigert werden.

Diese große Empfindlichkeit ist namentlich auch deshalb unbedenklich, weil die Dämpfung anderseits sehr günstig ausfällt. Die Trägheit des pendelnden Systems ist bei dieser Konstruktion viel größer als bei jeder anderen, weil die ganze Masse des Motors einen erheblichen Trägheitsradius bei der Bewegung um die Pendelachse besitzt. Wahrscheinlich wird infolgedessen auf eine Flüssigkeitsdämpfung verzichtet werden können.

Die Messung der Tourenzahl wird zweckmäßig stroboskopisch oder elektrisch ausgeführt.

Der Axialschub wird durch ein Dynamometer gemessen, welches den Pendelrahmen verhindert, die ihm sonst frei gegebene Drehung um eine vertikale Achse auszuführen. Das Dynamometer kann unmittelbar am Motor oder aber am entgegengesetzten Hebelende angebracht werden.

Einen besonderen Vorteil bietet die vorliegende Konstruktion bei der Bestimmung des Motorgewichts. War die Wage vorher tariert, so kann der Motor nach der Montage wie auf jeder anderen Wage gewogen werden, ein Vorteil, den keine der anderen Konstruktionen besitzt.

Demnach erscheinen alle Schwierigkeiten, welche der Anwendung des Pendelrahmens zur Prüfung von Flugmotoren im Wege stehen, beseitigt.

Bei der Abfassung dieser Arbeit wurde ich von verschiedenen Seiten teils durch Erteilung von Auskunft, teils durch Überlassung von Material in liebenswürdigster Weise unterstützt, so insbesondere von dem Advisory Committee for Aeronautics, dem Automobile Club de France, Herrn Professor Baer von der Technischen Hochschule zu Breslau, Herrn Dr.-Ing. Becker vom Laboratorium für Gaskraftmaschinen der Technischen Hochschule zu Berlin, Herrn Chefredakteur Béjeuhr von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Flugtechnik, der Firma Benz in Mannheim, der Firma Daimler in Untertürkheim und Berlin-Marienfelde, der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt in Adlershof, der Firma A. Dinse in Berlin-Reinickendorf, dem Luftschiffbau Zeppelin und der Neuen Automobil-Gesellschaft.

Allen diesen Herren, Vereinen und Gesellschaften spreche ich an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aus.

Ferner wurden bei der Arbeit folgende Literaturquellen benutzt:

Advisory Committee for Aeronautics, Interim report on the work for the year 1910—11. London 1910.

Dasselbe, Report on the Tests of petrol motors in the Alexander motor prize competition 1911. London 1912.

André, Moteurs d'Aviation et de Dirigeables.

Automobile Club de France, Bulletin Officiel de la Commission technique. Neuilly-sur-Seine, Juni 1911.

Baer, Neuere Versuchseinrichtungen im Maschinenlaboratorium der Kgl. Techn. Hochschule Breslau. Z. d. V. D. I., 12. September 1914.
Baumann, Der Kaiserpreiswettbewerb. Der Motorwagen, 20. Febr. 1913ff.
Becker, D.R.P. 267108, 1913.
Béjeuhr, Luftschrauben. München und Berlin 1912.
Bendemann, Die Versuchsanlage für den Wettbewerb um den Kaiserpreis für den besten deutschen Flugzeugmotor. Z. d. V. D. I., 16. Nov. 1912.
Derselbe, Die Durchführung und das Ergebnis des Wettbewerbes um den Kaiserpreis für den besten deutschen Flugzeugmotor. Z. d. V. D. I., 29. März 1913.
Derselbe, Die Entwicklung der Flugtechnik in Deutschland und die Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt. Technische Rundschau, 11. Juni 1913.
Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, D.R.P. 259924, 1913.
Dierfeld, Betriebs- und Arbeitsverfahren bei der Neuen Automobil-Gesellschaft A.-G. in Oberschöneweide. Technik und Wirtschaft, Juli 1913.
Frhr. v. Doblhoff, Über Flugmotorenuntersuchungen. Jahrbuch d. Wiss. Ges. f. Luftfahrt 1914/15.
Horseless age, A. C. A's. New Engine Testing Dynamometer, 14. September 1910.
Langer und Finzi, Die Messung der mechanischen Leistung durch elektrische Pendelmaschinen. Z. d. V. D. I., 10. Januar 1914.
Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst.
Lumet, Résultats et Interprétation d'Essais de moteurs d'aviation. Paris 1912.
Madelung, Bemerkung zur Versuchsanlage für den Kaiserpreis. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, 28. Dezember 1912.
Riedler, Neue Prüfstände für Automobil- und Flugmotoren. Technische Rundschau, 17. Dezember 1913.
Scheit, Bestimmung der Leistung von Motor und Propeller eines startbereiten Flugzeuges. Deutsche Luftfahrerzeitschrift, Band XVI, Heft 8.
Derselbe, Prüfung im Pendelrahmen. Allgemeine Automobilzeitung 1912, Bd. II, Nr. 18.
Derselbe, Vorrichtung zur gleichzeitigen Messung des Axialschubes und des Drehmomentes von Motoren. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, 28. März 1914.
Seppeler, Über Flugmotorenuntersuchungen. Jahrbuch d. Wiss. Ges. f. Luftfahrt 1914/15.
Steinitz, Die Prüfung von Flugmotoren. Der Motorwagen, 20. Februar 1913.
Derselbe, Der Einfluß des Luftzustandes auf die Flugmotoren. Deutsche Luftfahrerzeitschrift, 19. März 1913.
Derselbe, Die Stoßkraft der Rauchgase von Flugmotoren. Der Motorwagen, 10. Oktober 1913.
Derselbe, D.R.P. 270275.
Derselbe, Ein neuer Pendelrahmen zur Prüfung von Flugmotoren. Deutsche Luftfahrerzeitschrift, 18. März 1914.
Vorreiter, Die vierte Pariser Luftschiffahrtsausstellung. Z. d. V. D. I., 8. März 1913.
Graf v. Zeppelin jr., Mitteilungen des Luftschiffbau Zeppelin, Friedrichshafen. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 1911, Heft 21.

Lebenslauf.

Ich, Otto Theodor Steinitz, wurde im Juni 1886 als Sohn des Kaufmanns und Stadtverordneten Siegfried Steinitz zu Beuthen, O.-S., geboren.

Ostern 1903 bestand ich die Abschluß- und Ostern 1906 die Reifeprüfung am Realgymnasium zum heiligen Geist in Breslau.

Darauf studierte ich Allgemeinen Maschinenbau an der Kgl. Techn. Hochschule zu Berlin, an der ich auch im März 1909 die Vorprüfung und im Juni 1911 die Diplomhauptprüfung bestand. Mein Studium unterbrach ich zum Zwecke praktischer Tätigkeit in verschiedenen Werken.

Nach Beendigung desselben trat ich in den Dienst der Berlin-Anhaltischen Maschinenbau-A.-G., Dessau. Danach wirkte ich als Direktionsassistent an der Errichtung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt in Adlershof mit. Später widmete ich mich literarischen, experimentellen und konstruktiven Arbeiten, hauptsächlich auf dem Gebiete der Flugmotorentechnik. Daneben dozierte ich an Berliner maschinentechnischen Fachschulen.

Zu Kriegsbeginn wurde ich vom Kriegsministerium der Firma Lorenzen in Neukölln zur Verfügung gestellt, für welche ich bereits seit April 1913 sämtliche konstruktiven Arbeiten ausführte. Hier betätige ich mich seitdem auch als Betriebsleiter hauptsächlich im Bau von Luftschiffspropellern.

Bei der Abfassung meiner Doktordissertation wurde ich von Herrn Professor Dr.-Ing. Baer in liebenswürdigster Weise beraten, wofür ich demselben zu großem Danke verpflichtet bin.